



**Ana Augusta**  
**Bernardo da Graça**

**Estudo do Comportamento Mecânico e Estrutural de**  
**Espumas de Alumínio**



**Ana Augusta  
Bernardo da Graça**

**Estudo do Comportamento Mecânico e Estrutural de  
Espumas de Alumínio**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Doutora Isabel Maria Alexandrino Duarte, Investigadora do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação da Universidade de Aveiro e do Professor Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias, docente do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, António Graça e Vitória Bernardo, pelas pessoas fantásticas que são. E ao Ricardo, por todo o apoio, carinho e compreensão.

## **o júri**

presidente

**Prof. Dr. Francisco José Malheiro Queirós de Melo**  
professor associado da Universidade de Aveiro

**Prof. Dr. António Joaquim Mendes Ferreira**  
professor associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Dr.<sup>a</sup> Isabel Maria Alexandrino Duarte**  
investigadora do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação da Universidade de Aveiro

**Prof. Dr. Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias**  
professor auxiliar da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Este trabalho não teria sido possível sem a colaboração dos orientadores científicos, Dr.<sup>a</sup> Isabel Duarte e Prof. Dr. Filipe Teixeira-Dias, a quem agradeço todo o apoio e disponibilidade demonstrados.

Agradeço à empresa M.J. Amaral, na pessoa do Sr. Manuel Vide, pelo fabrico e corte das espumas de Alumínio utilizadas nos ensaios.

Da FUNFRAP, ao Sr. Rui Mendes e ao Sr. Domingos Marinho, pelo apoio prestado na análise microscópica e polimento das amostras.

Um agradecimento a Ricardo Moutinho, cujos conhecimentos de fotografia, análise e tratamento de imagem se revelaram uma ajuda importante na realização deste trabalho, e a Sónia Marabuto, pelas sugestões dadas.

**palavras-chave**

espumas de Alumínio, pulverotecnologia, propriedades mecânicas, mecanismos de deformação, ensaio de compressão, ensaio de flexão em três pontos.

**resumo**

As espumas de Alumínio de porosidade fechada fazem parte de uma nova classe de materiais, reunindo um conjunto de propriedades peculiares, tais como a baixa densidade, a elevada rigidez, a excelente capacidade de absorção de energia de impacto e de amortecimento de ruído e vibrações.

A avaliação das propriedades mecânicas das espumas é bastante complexa. Torna-se necessário, por isso, analisar detalhadamente estes materiais de forma a viabilizar potenciais aplicações.

O objectivo deste trabalho é estudar o comportamento mecânico de espumas de Alumínio, obtidas por pulverotecnologia, quando submetidas a esforços de natureza distinta, identificando os mecanismos de deformação. Para tal, foram realizados ensaios de compressão e flexão em três pontos, a diferentes velocidades de deformação.

Os resultados revelam que os mecanismos de deformação dependem da natureza do esforço. Para a gama de velocidades utilizadas neste trabalho, não se prova a influência da velocidade de deformação no comportamento das espumas à compressão. No entanto, nos ensaios de flexão esta dependência é notória.

Apesar da reprodutibilidade das propriedades de espumas fabricadas por este processo ainda não ter sido alcançada, originando estruturas celulares distintas, este material apresenta características que o tornam uma boa alternativa em aplicações estruturais ultraleves de absorção de energia.

**keywords**

Aluminum foams, powder metallurgy, mechanical properties, deformation mechanism, compression tests, three-point bending tests.

**abstract**

Closed-cell Aluminum foams belong to a new class of materials, exhibiting a set of uncommon properties, such as low-density, high-stiffness, excellent impact energy absorption, noise and vibration dampening.

Appreciation of the foams' mechanical properties is a quite complex task. Therefore, detailed studies are necessary in order to increase the viability of potential applications using this kind of material.

The goal of this work is to study the mechanical behaviour of Aluminum foams obtained by Powder Metallurgy, when submitted to different loading conditions, by identifying the deformation mechanisms. To accomplish that, compression and three-point bending tests were conducted at different strain-rates.

Results show that the deformation mechanisms depend on the loading conditions. In the strain-rate range used in this study, the influence of the strain-rate in the foams' compressive behaviour cannot be confirmed. On the other hand, this relation is clearly visible in the bending tests.

Although the reproducibility of the foams' properties has not been achieved, causing distinct cellular structures, these materials have features that make them a good alternative for lightweight structural applications of energy absorption.

# ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>v</b>
-------------------------------	----------

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
------------------------------	----------

<b>NOMENCLATURAS .....</b>	<b>xi</b>
----------------------------	-----------

<b>1. NOTAS INTRODUTÓRIAS .....</b>	<b>1</b>
-------------------------------------	----------

1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. ACTIVIDADES DESENVOLVIDAS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	3

<b>2. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>5</b>
--------------------------------	----------

2.1. INTRODUÇÃO.....	5
2.2. TOPOLOGIA DAS ESPUMAS .....	6
2.3. PROCESSOS DE FABRICO .....	7
2.3.1. DEPOSIÇÃO DE PARTÍCULAS IONIZADAS .....	9
2.3.2. PRODUÇÃO DE ESPUMAS METÁLICAS A PARTIR DE METAL FUNDIDO .....	9
2.3.2.1. EXPANSÃO DIRECTA DO METAL FUNDIDO .....	9
2.3.2.2. SOLIDIFICAÇÃO EUTÉCTICA DE SÓLIDO-GÁS.....	9
2.3.2.3. FUNDIÇÃO DE PRECISÃO.....	9
2.3.2.4. ESPUMAS SINTÁTICAS USANDO ENCHIMENTO METÁLICO .....	10
2.3.3. PRODUÇÃO DE ESPUMAS METÁLICAS A PARTIR DE PÓS METÁLICOS .....	10
2.3.3.1. APRISIONAMENTO DE GÁS .....	10
2.3.3.2. SINTERIZAÇÃO DE PÓS .....	10
2.3.3.3. PULVEROTECNOLOGIA .....	10
2.4. PROPRIEDADES .....	13
2.4.1. DENSIDADE RELATIVA .....	13
2.4.2. PARÂMETROS ESTRUTURAIS .....	14
2.4.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	15
2.4.3.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	15
2.4.3.2. COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO/TRACÇÃO.....	17

2.4.3.3. CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA .....	18
2.4.4. PROPRIEDADES TÉRMICAS .....	21
2.4.5. PROPRIEDADES ACÚSTICAS .....	22
2.4.6. PROPRIEDADES ELÉCTRICAS.....	23
2.5. ENSAIOS MECÂNICOS .....	23
2.5.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	23
2.5.2. ENSAIO DE TRACÇÃO .....	25
2.5.3. ENSAIO DE FLEXÃO .....	27
2.6. APLICAÇÕES .....	30
2.6.1. INDÚSTRIA AUTOMÓVEL.....	32
2.6.2. OUTRAS INDÚSTRIAS.....	34
<b>3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>35</b>
3.1. ENSAIOS MECÂNICOS .....	35
3.1.1. COMPRESSÃO DE AMOSTRAS DE GEOMETRIA CILÍNDRICA .....	35
3.1.1.1. MATERIAL .....	35
3.1.1.2. METODOLOGIA.....	35
3.1.2. COMPRESSÃO DE AMOSTRAS DE GEOMETRIA PARALELEPÍPEDICA .....	37
3.1.2.1. MATERIAL .....	37
3.1.2.2. METODOLOGIA.....	37
3.1.3. ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS.....	38
3.1.3.1. MATERIAL .....	38
3.1.3.2. METODOLOGIA.....	39
3.2. OBSERVAÇÃO E ANÁLISE.....	40
3.2.1. FOTOGRAFIA .....	40
3.2.2. MICROSCOPIA ÓPTICA .....	41
<b>4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
4.1. COMPRESSÃO DE AMOSTRAS DE GEOMETRIA CILÍNDRICA .....	43
4.1.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA CELULAR DAS AMOSTRAS .....	43
4.1.2. COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO .....	51
4.1.2.1. REGIÕES DAS CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO EM COMPRESSÃO .....	55
4.1.2.2. MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO EM COMPRESSÃO.....	56

4.1.2.2.1. DEFORMAÇÃO ELÁSTICA .....	56
4.1.2.2.2. COLAPSO DAS CÉLULAS .....	56
4.1.2.2.3. DENSIFICAÇÃO .....	61
4.2. ESTUDO DO EFEITO DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO NAS ESPUMAS DE ALUMÍNIO .....	62
4.3. FLEXÃO DE PROVETES DO TIPO SANDUÍCHE .....	67
4.3.1. COMPORTAMENTO À TRACÇÃO .....	68
4.3.1.1. MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO EM TRACÇÃO .....	68
4.3.1.1.1. DEFORMAÇÃO ELÁSTICA .....	68
4.3.1.1.2. DEFORMAÇÃO PLÁSTICA .....	68
4.3.1.1.3. FRACTURA.....	69
4.3.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS .....	70
4.3.3. ANÁLISE DA FRACTURA .....	74
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>76</b>
5.1. ESTRUTURA CELULAR .....	76
5.2. MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO .....	77
5.3. COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO .....	77
5.4. COMPORTAMENTO À FLEXÃO .....	78
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>79</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>81</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Espuma de Alumínio de estrutura aberta produzida pela <i>ERG Aerospace</i> [10].	6
Figura 2.2	Espuma de Alumínio de estrutura fechada produzida pela <i>Shinko Wire (Alporas)</i> [10].	7
Figura 2.3	Variação da densidade e do tamanho de células para espumas obtidas através de diferentes processos de fabrico [13].	8
Figura 2.4	Pós de metal e de agente <i>expansor</i> que dão origem ao material precursor [16].	11
Figura 2.5	Produtos obtidos pelo processo de pulverotecnologia, FOAMINAL® [18].	12
Figura 2.6	Produtos obtidos pelo processo de pulverotecnologia, ALUlight® [19].	12
Figura 2.7	Comparação da densidade de diferentes espumas de estrutura fechada [6].	13
Figura 2.8	Módulo de Young em função da densidade relativa para diferentes tipos de espumas de Alumínio de porosidade aberta (Duocel) e fechada (Alulight e Alporas) [5].	15
Figura 2.9	Curva típica de tensão-deformação de uma espuma metálica sujeita a compressão [6].	17
Figura 2.10	Curva típica de tensão-deformação de uma espuma metálica à tracção [6].	18
Figura 2.11	Curvas tensão-deformação para espumas de Alumínio de diferentes densidades quando sujeitas a compressão [5].	19
Figura 2.12	Comparação entre absorsores de energia: real e <i>ideal</i> [5].	20



Figura 2.13 . Comparação da capacidade de absorção de energia de vários tipos de espumas [6]. .....	21
Figura 2.14 Curvas tensão-deformação de espumas de Alumínio de fabricantes distintos [24]. .....	24
Figura 2.15 Curvas tensão-deformação de espumas de Alumínio de diferentes fabricantes submetidas a esforços de tracção [24].....	26
Figura 2.16 Geometrias de provetes do tipo sanduíche: (a) barra, (b) coluna circular, (c) coluna prismática, (d) disco e (e) elemento de casca [13].....	28
Figura 2.17 Sanduíche em forma de barra, submetida a flexão em três pontos [13].....	28
Figura 2.18 Curva força-deslocamento em placas sanduíche sujeitas a flexão em três pontos, colapso do núcleo [13]. .....	30
Figura 2.19 Curva força-deslocamento em placas sanduíche sujeitas a flexão em três pontos, colapso por indentação [13]. .....	30
Figura 2.20 Principais aplicações das espumas metálicas [6].....	31
Figura 2.21 Potenciais aplicações das espumas metálicas no sector automóvel [29].....	33
Figura 2.22 Estrutura de absorção de impacto, ALUlight® [19]. .....	33
Figura 2.23 Conceito de <i>design</i> de um veículo ultra-leve, Karmann [32]. .....	33
Figura 2.24 Blindagem em sanduíche com núcleo de espuma de Alumínio [33]. .....	34
Figura 3.1 Máquina universal de ensaios mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.....	36
Figura 3.2 Colocação das amostras na máquina de ensaios.....	36

Figura 3.3	Amostras de espumas de Alumínio antes do corte.....	37
Figura 3.4	Esquema da geometria das amostras após o corte. ....	37
Figura 3.5	Provete de espuma de Alumínio antes de ser aplicado o esforço.	38
Figura 3.6	Secção transversal do provete de espuma de Alumínio após a compressão.....	38
Figura 3.7	Provete do tipo sanduíche durante o processo de cura da cola. .	39
Figura 3.8	Representação da posição do provete para início de ensaio. ....	39
Figura 3.9	Início do ensaio de flexão. ....	40
Figura 3.10	Provete fracturado após ensaio de flexão. ....	40
Figura 3.11	Microscópio óptico LEICA DMLM 34. ....	41
Figura 3.12	A) Lupa Nachet NS50 com fonte luminosa externa [35] B) Imagem obtida com a lupa. ....	41
Figura 4.1	Amostra de referência da Liga AlSi7.....	44
Figura 4.2	Distribuição da dimensão de poros para a amostra de referência da liga AlSi7. ....	44
Figura 4.3	Diferentes geometrias dos poros: A) poro esférico B) poro poliédrico. ....	45
Figura 4.4	Amostra do material precursor observada ao microscópio.....	46
Figura 4.5	Presença de imperfeições nas paredes celulares de uma amostra de espuma observada ao microscópio. ....	46
Figura 4.6	Amostra de referência da liga AlSi7 Aparas. ....	47
Figura 4.7	Distribuição da dimensão de poros para a amostra de referência da liga AlSi7 Aparas.....	48

Figura 4.8	Presença de pequenas porosidades e fissuras A) película exterior B) paredes celulares.....	48
Figura 4.9	Amostra de referência da liga Al 6061.....	49
Figura 4.10	Distribuição da dimensão de poros para a amostra de referência da liga Al 6061. ....	50
Figura 4.11	A) Presença de microporos e fissuras na película exterior B) presença de microporos nas paredes celulares. ....	50
Figura 4.12	Curvas típicas globais força-deslocamento para os três tipos de espumas. ....	51
Figura 4.13	Imagens das amostras da liga AlSi7 para diferentes zonas da curva força-deslocamento. ....	52
Figura 4.14	Imagens das amostras da liga AlSi7 Aparas para diferentes zonas da curva força-deslocamento.....	53
Figura 4.15	Imagens das amostras da liga Al 6061 para diferentes zonas da curva força-deslocamento. ....	54
Figura 4.16	Mecanismos de deformação dos poros [36]. ....	57
Figura 4.17	Bandas de deformação para amostras submetidas a um deslocamento de 8 mm ....	57
Figura 4.18	Esquema do corte de painéis de material precursor. ....	58
Figura 4.19	Esquema de expansão de espumas fabricadas a partir de material precursor de geometria cilíndrica. ....	58
Figura 4.20	Esquema da colocação das aparas de material precursor no interior do molde. ....	59
Figura 4.21	Perfis de expansão de duas aparas de material precursor. ....	59

Figura 4.22 Bandas de deformação para amostras submetidas a um deslocamento de 16 mm A) Tipo I – AlSi7; B) Tipo II – AlSi7 Aparas.....	60
Figura 4.23 Deformação na região de densificação. A) Esmagamento das células; B) Zona densa. ....	61
Figura 4.24 Curvas médias força-deslocamento para diferentes velocidades de deformação. ....	62
Figura 4.25 Curvas individuais força-deslocamento para diferentes velocidades de deformação.....	63
Figura 4.26 Amostra de espuma de Alumínio de onde foram obtidos os provetes submetidos a esforços de compressão à velocidade de deformação de 20 mm/min.....	65
Figura 4.27 Representação esquemática da aplicação do esforço e respectivo resultado. ....	67
Figura 4.28 Alinhamento das arestas celulares com o eixo de aplicação da força [20]. ....	69
Figura 4.29 Fractura por propagação de fendas em A) película exterior; B) núcleo. ....	69
Figura 4.30 Esquema de um provete do tipo sanduíche [13]. ....	70
Figura 4.31 Curvas médias momento-rotação para diferentes velocidades de deformação. ....	71
Figura 4.32 Gráfico do módulo de Young em função da velocidade de ensaio. ....	73
Figura 4.33 Gradiente de densidades. ....	74
Figura 4.34 Imagens das secções transversais dos provetes e respectivas faces exteriores para as diferentes velocidades de ensaio. ....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Cronograma do planeamento de trabalhos para 16 semanas. ....	2
Tabela 2.1	Classificação dos processos de fabrico das espumas metálicas [6]. .....	8
Tabela 2.2	Lista de parâmetros que possibilitam a caracterização de uma espuma metálica [5]. ....	14
Tabela 2.3	Modelos matemáticos para o módulo de Young das espumas metálicas [6]. ....	16
Tabela 2.4	Características de espumas de diferentes fabricantes [24]. ....	24
Tabela 2.5	Resultados dos ensaios de compressão para espumas de diferentes densidades e fabricantes distintos [24]. ....	25
Tabela 2.6	Resultados dos ensaios de tracção para diferentes espumas [24]. .....	27
Tabela 4.1	Propriedades das espumas de Alumínio submetidas a esforços de compressão para velocidades de deformação diferentes. ....	65
Tabela 4.2	Propriedades das espumas de Alumínio submetidas a flexão para velocidades diferentes. ....	73

## NOMENCLATURAS

Símbolo	Descrição	Unidades
$\rho$	Densidade	$kg \cdot m^{-3}$
$\rho_s$	Densidade do sólido base	$kg \cdot m^{-3}$
$\rho^*$	Densidade da espuma	$kg \cdot m^{-3}$
$\Phi$	Fracção de sólido nas aresta das células	—
$\nu$	Coeficiente de Poisson	—
$\varepsilon$	Deformação	—
$\sigma_{y,s}$	Tensão limite de elasticidade do material sólido	$N \cdot m^{-2}$
$\sigma_{pl}$	Tensão de plateau	$N \cdot m^{-2}$
$\sigma_{0.2}$	Tensão limite de elasticidade a 0.2%	$N \cdot m^{-2}$
$\theta$	Ângulo de rotação	$rad$
$\delta$	Deflexão	$m$
$\eta$	Eficiência de absorção de energia	—
$\alpha$	Coeficiente de expansão térmico	$^{\circ}C^{-1}$
$\lambda$	Condutividade térmica	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$A$	Área	$m^2$
$b$	Largura	$m$
$C_v$	Calor específico por unidade de volume	$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
$D$	Diâmetro	$m$
$E_s$	Módulo de Young do material sólido	$N \cdot m^{-2}$
$E_c$	Módulo de Young do núcleo num painel sanduíche	$N \cdot m^{-2}$
$E_f$	Módulo de Young da chapa num painel sanduíche	$N \cdot m^{-2}$
$E_v$	Energia absorvida por unidade de volume	$J \cdot m^{-3}$
$E_{abs}$	Energia absorvida	$J$
$F$	Força	$N$
$G$	Módulo de distorção	$N \cdot m^{-2}$

$H$	Altura	$m$
$I$	Segundo momento de inércia	$m^4$
$K$	Módulo volumétrico	$N \cdot m^{-2}$
$l$	Comprimento	$m$
$m$	Massa	$kg$
$M$	Momento flector	$N \cdot m$
$t$	Espessura	$m$
$v$	Velocidade	$m \cdot s^{-1}$
$V_c$	Fracção volúmica do núcleo	—
$V_f$	Fracção volúmica das chapas em painéis sanduíche	—

### Símbolos Químicos

Al	Alumínio
Si	Silício

### Siglas

P/M	Powder Metallurgy (Pulverotecnologia)
-----	---------------------------------------

# **1. NOTAS INTRODUTÓRIAS**

## **1.1. ENQUADRAMENTO**

As espumas metálicas de estrutura porosa fechada e leve, em particular as espumas de ligas de Alumínio, são materiais com potencialidades na produção de peças e componentes para a indústria de transportes com destaque no sector automóvel.

Os principais campos de aplicação identificados neste sector são as estruturas leves, de absorção de energia e de amortecimento. Estas espumas podem, por exemplo, ser usadas nos painéis do piso e do tecto, nas barras protectoras frontais e laterais, nas estruturas de reforço da carroçaria, nos *capots* e noutras aplicações específicas.

Desta forma, umas das potenciais aplicações das espumas metálicas é em estruturas de absorção de energia, que são submetidas a esforços de tracção e/ou compressão, sendo de extrema importância avaliar o seu comportamento mecânico.

A avaliação das propriedades mecânicas e do comportamento das espumas metálicas é bastante complexa, dado que dependem das propriedades decorrentes da estrutura porosa (geometria, forma e espessura), das propriedades intrínsecas dos materiais constituintes e, no caso das espumas de estrutura fechada, do tipo de atmosfera aprisionada nas próprias células. As propriedades destes materiais derivam da sua natureza metálica em combinação com a sua estrutura celular, que lhes confere excelente desempenho em certas aplicações comparativamente com outros materiais.

O objectivo deste trabalho é a avaliação do comportamento mecânico e da integridade estrutural das espumas quando sujeitas a esforços de natureza distinta e perceber de que forma a velocidade de deformação, o tipo de liga e a geometria do material precursor influenciam os resultados.



## 1.2. ACTIVIDADES DESENVOLVIDAS

Na realização deste trabalho de investigação, no âmbito da Dissertação em Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, foi adoptado o plano de tarefas representado na Tabela 1.1.

Tarefas	Semanas															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. Estado da Arte																
2. Caracterização morfológica, microestrutural e física																
3. Avaliação do comportamento mecânico																
4. Elaboração da dissertação																

**Tabela 1.1**

Cronograma do planeamento de trabalhos para 16 semanas.

O trabalho iniciou-se (tarefa 1) com uma revisão bibliográfica na área das espumas metálicas no que respeita aos processos de fabrico, às propriedades, e às aplicações destes materiais. De acordo com o objectivo do trabalho, também se fez um levantamento dos ensaios mecânicos realizados em espumas.

Na segunda tarefa procedeu-se à caracterização do material em estudo, através da determinação da densidade e da observação e análise da estrutura celular das amostras.

Na terceira tarefa foram realizados ensaios mecânicos, em amostras de espumas de Alumínio, com o objectivo de identificar e compreender os mecanismos de deformação que ocorrem em diferentes condições de ensaio, correlacionando-os com a estrutura celular.

Por último, a quarta tarefa correspondeu à redacção da dissertação.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação encontra-se organizada em 6 (seis) capítulos, incluindo este primeiro capítulo introdutório. Os restantes capítulos são descritos nos parágrafos seguintes.

No Capítulo 2 é apresentado o estado da arte deste tipo de materiais, onde são referidos os processos de fabrico, as propriedades e principais aplicações das espumas, bem como os ensaios mecânicos passíveis de ser realizados.

No Capítulo 3 são descritos os procedimentos experimentais deste trabalho, onde se incluem os ensaios mecânicos e análise de imagem.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos para os diferentes ensaios e respectiva discussão no que diz respeito à estrutura celular, mecanismos de deformação e propriedades mecânicas das espumas.

No Capítulo 5 expõem-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido.

No Capítulo 6 apresentam-se propostas de trabalhos futuros nesta área de investigação.

No final da dissertação encontram-se as referências bibliográficas utilizadas na realização deste trabalho.



## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. INTRODUÇÃO

Nos dias que correm, tem-se observado uma crescente preocupação com a qualidade de vida, e as soluções de engenharia precisam responder o melhor possível às exigências económicas, sociais e políticas do panorama actual.

Consequentemente, a tecnologia tem evoluído com as necessidades de um mercado cada vez mais competitivo. Várias indústrias são impelidas a desenvolver e otimizar produtos, recorrendo a estudos na área de novos materiais e processos de fabrico, sem descurar funcionalidades, custos, padrões de qualidade, impacto ambiental, *etc.*

Estão incluídos nesses novos materiais os materiais celulares, caracterizados pela presença de espaços vazios, designados por poros ou células, distribuídos no interior de uma matriz polimérica, cerâmica ou metálica, que se revelam interessantes para o fabrico de diversos componentes devido às propriedades que exibem, tais como: baixo peso específico, elevada rigidez e dureza, boa absorção de energia de impacto e vibrações, entre outras [1].

A primeira tentativa de transformar um metal em espuma foi realizada por B. Sosnik em 1943 [2] que para criar os poros, adicionou Mercúrio a Alumínio fundido. Em 1956, J.C. Elliot [3] substituiu o Mercúrio por agentes expansíveis gerando gás por decomposição térmica. Desta forma, foi possível desenvolver espumas sem o inconveniente de lidar com a toxicidade do Mercúrio. Em 1959, Benjamin Allen da United Aircraft Corp. em Delaware [4], inventou o processo *PCF - Powder Compact Foaming*, cuja técnica se assemelha ao actual processo de pulverotecnologia.

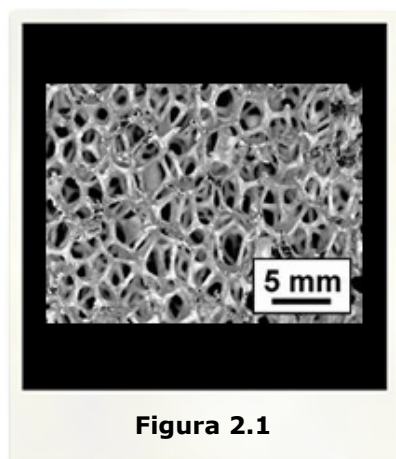
O sucesso na preparação das primeiras espumas metálicas e a descoberta das suas notórias propriedades suscitaram grande entusiasmo em relação a estes materiais. Mas devido a *design* inadequado de componentes, baixa

reprodutibilidade das propriedades, falta de procedimentos de teste e cálculo, dificuldades e custos de produção, estes materiais ainda não são utilizados em larga escala. No entanto, o interesse em metais celulares está a crescer e vários estudos têm sido realizados para melhorar os processos de fabrico e a análise de propriedades [6].

Actualmente, produtos em espuma de Alumínio estão a ser comercializados por empresas como a Cymat (no Canadá), a Shinko Wire (no Japão), a Schunk (na Alemanha), a Mepura (na Áustria) e a Recemat (na Holanda) [7-10].

## 2.2. TOPOLOGIA DAS ESPUMAS

As espumas metálicas fazem parte de uma classe importante de materiais celulares leves usados em aplicações de engenharia. Estas espumas podem ser classificadas em dois tipos, dependendo da topologia dos poros (ou células) que as constituem. Ao primeiro tipo de espumas dá-se o nome de **espumas de estrutura aberta**, onde os poros estão ligados entre si [11] partilhando somente as arestas. No segundo tipo, denominado **espumas de estrutura fechada**, os poros partilham entre si quer as paredes quer as arestas [6]. Exemplos dos dois tipos de estrutura das espumas estão representados nas Figuras 2.1 e 2.2 [12].

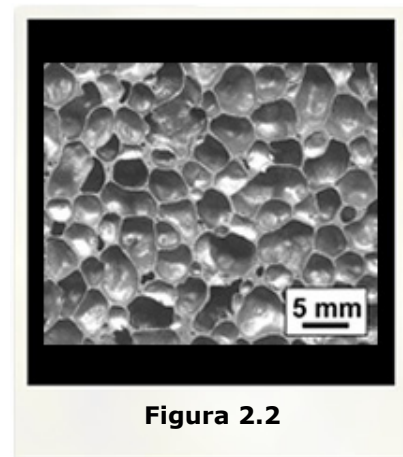


**Figura 2.1**

Espuma de Alumínio de estrutura aberta produzida pela *ERG Aerospace* [10].

**Figura 2.2**

Espuma de Alumínio de estrutura fechada produzida pela *Shinko Wire (Alporas)* [10].

**Figura 2.2**

A estrutura celular das espumas depende do processo de fabrico pelo qual são obtidas. No subcapítulo seguinte são apresentados os vários processos de fabrico.

### 2.3. PROCESSOS DE FABRICO

Os metais celulares podem ser obtidos por vários processos. O processo de fabrico afecta a distribuição do material da parede celular de tal forma que as propriedades dos materiais fabricados por diferentes métodos não são comparáveis [5].

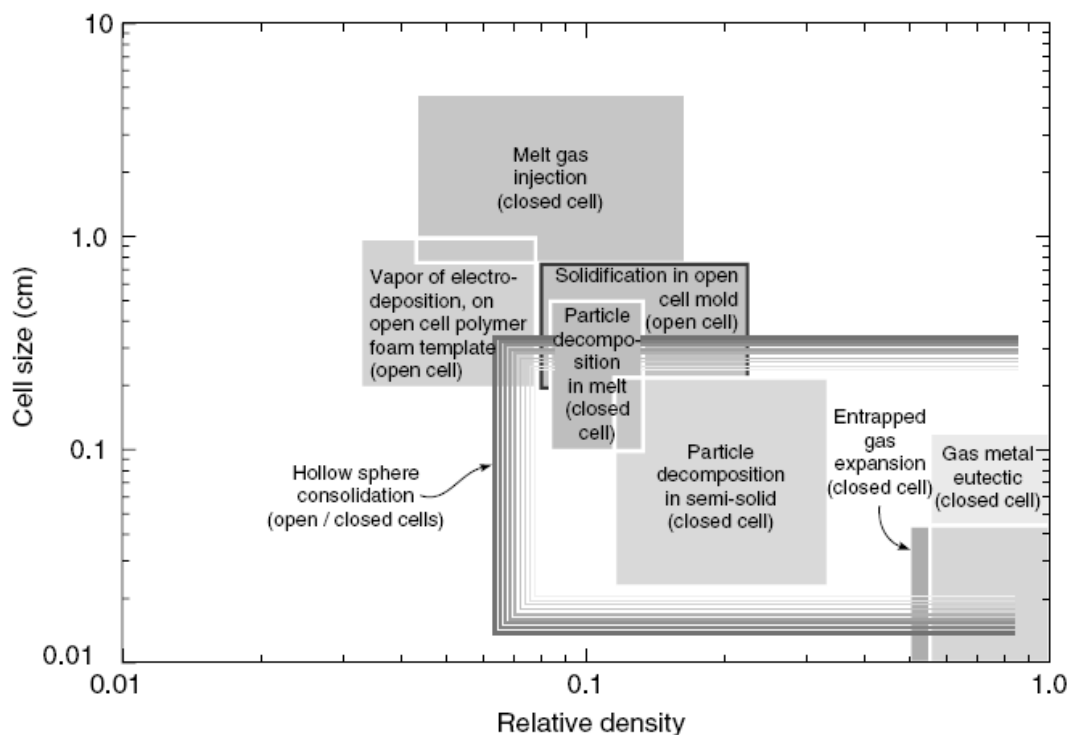
De acordo com o estado inicial do metal – fundido, pó ou ionizado – os processos de fabrico das espumas metálicas podem ser divididos em três grupos, como se mostra na Tabela 2.1 [6].

A densidade relativa das espumas e o tamanho de célula também dependem do processo de fabrico. Na Figura 2.3 está representada a variação da densidade relativa e do tamanho de célula de acordo com o processo de fabrico, bem como a estrutura celular a que cada um dá origem.

Processos de fabrico das espumas metálicas		
A partir de partículas ionizadas	A partir de metal fundido	A partir de pós metálicos
<p><b>Técnicas de Deposição:</b> <i>Deposition technique</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Deposição química de vapor <i>Chemical Vapour Deposition (CVD)</i></li> <li>- Deposição física de vapor <i>Physical Vapour Deposition (PVD)</i></li> <li>- Deposição directa de vapor <i>Direct Vapour Deposition (DVD)</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Expansão directa do metal fundido <i>Direct foaming melts</i></li> <li>- Solidificação eutética de sólido-gás <i>Solid-gas eutectic solidification</i></li> <li>- Fundição de precisão <i>Investment casting</i></li> <li>- Espumas sintáticas usando enchimento metálico <i>Syntactic foams using filler metal</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pulverotecnologia <i>Powder Metallurgy</i></li> <li>- Espumas a partir de suspensões <i>Foaming of slurries</i></li> <li>- Aprisionamento de gás <i>Gas entrapment</i></li> </ul>

**Tabela 2.1**

Classificação dos processos de fabrico das espumas metálicas [6].



**Figura 2.3**

Variação da densidade e do tamanho de células para espumas obtidas através de diferentes processos de fabrico [13].

### **2.3.1. DEPOSIÇÃO DE PARTÍCULAS IONIZADAS**

É possível produzir espumas metálicas através de métodos de deposição, nomeadamente, por deposição química de vapor (CVD), deposição física de vapor (PVD) ou deposição directa de vapor (DVD). No caso particular do material de base ser o Alumínio este processo não é aplicável [6, 14].

### **2.3.2. PRODUÇÃO DE ESPUMAS METÁLICAS A PARTIR DE METAL FUNDIDO**

#### 2.3.2.1. EXPANSÃO DIRECTA DO METAL FUNDIDO

A porosidade das espumas metálicas obtidas por este processo deve-se à injeção de gás, ou à presença de um agente *expansor* que liberta gás por decomposição térmica, no interior do metal fundido. Este processo origina espumas de estrutura celular fechada e é utilizado para produzir elevados volumes de painéis deste material [6, 13, 14].

#### 2.3.2.2. SOLIDIFICAÇÃO EUTÉCTICA DE SÓLIDO-GÁS

Neste processo, o metal é fundido numa atmosfera de Hidrogénio sendo posteriormente arrefecido através do ponto eutético, em que o Hidrogénio é a fase gasosa no interior do metal [6, 13, 14].

#### 2.3.2.3. FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

No processo de fundição de precisão, o molde, de espuma polimérica com estrutura celular aberta, é revestido com um material cerâmico de onde resulta um *contra-molde* de espuma cerâmica, também com estrutura celular aberta. Posteriormente, o metal fundido é vazado para o interior da espuma cerâmica, onde solidifica. Depois de removido o constituinte do *contra-molde* tem-se a espuma metálica com geometria e porosidade iguais às da ferramenta (molde) que lhe deu origem. Devido à sua estrutura aberta, as espumas metálicas obtidas por este processo são utilizadas em reservatórios de armazenamento de gases e líquidos [6, 13, 14].



#### 2.3.2.4. ESPUMAS SINTÁTICAS USANDO ENCHIMENTO METÁLICO

As espumas obtidas por este processo resultam da infiltração de metal fundido no interior de grânulos inorgânicos ou esferas de baixa densidade [6, 14].

### **2.3.3. PRODUÇÃO DE ESPUMAS METÁLICAS A PARTIR DE PÓS METÁLICOS**

#### 2.3.3.1. APRISIONAMENTO DE GÁS

O método de aprisionamento de gás consiste na compactação de pós metálicos numa atmosfera gasosa em que o gás fica aprisionado na matriz metálica, dando origem a um material precursor. Este material precursor, quando aquecido, expande devido à pressão interna provocada pelo gás formando uma espuma [6, 14].

#### 2.3.3.2. SINTERIZAÇÃO DE PÓS

É possível produzir materiais porosos com estrutura celular aberta ou interligada através de expansão de suspensões ou pós. Este método consiste na *sinterização* de pós metálicos sem que estes sejam sujeitos a uma compactação prévia e é utilizado, por exemplo, na produção de filtros com porosidade controlada e no fabrico de eléctrodos porosos, entre outras aplicações [6, 14, 15].

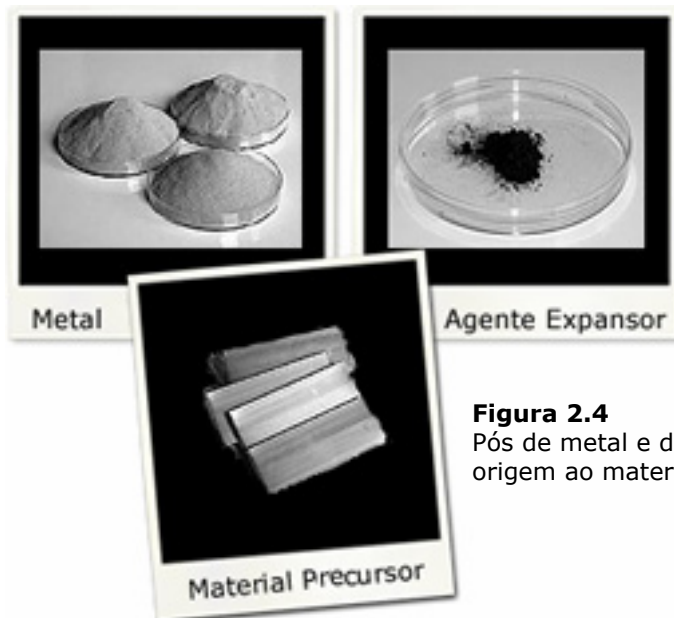
#### 2.3.3.3. PULVEROTECNOLOGIA

As espumas produzidas pelo processo de *pulverotecnologia* (P/M – *Powder Metallurgy*) resultam do aquecimento de um material precursor obtido por compactação de uma mistura de pós metálicos com pós de agente *expansor* [6, 14, 15].

Neste trabalho de investigação foram utilizadas espumas de Alumínio obtidas pelo processo de P/M e, por isso, segue-se uma descrição mais detalhada do processo.

A *Pulverotecnologia* pode ser definida como um conjunto de técnicas que engloba a produção de pós metálicos e o seu processamento até à obtenção de produtos metalúrgicos consolidados numa massa de pós coerentes [15]. Este processo divide-se basicamente em duas etapas. A primeira etapa consiste na compactação a quente de uma mistura de pós de metal e de pós de agente *expansor*, de forma a obter um material praticamente isento de porosidade, designado por material precursor. Os agentes *expansores* geralmente utilizados são os Hidretos de metal, o Carboneto de Cálcio, entre outros, dependendo do tipo de metal que se pretende expandir. As técnicas de compactação vulgarmente usadas são a prensagem ou a extrusão a quente.

No caso das espumas de ligas de Alumínio estudadas neste trabalho, o agente expansor utilizado foi o Hidreto de Titânio (Figura 2.4).



**Figura 2.4**  
Pós de metal e de agente *expansor* que dão origem ao material precursor [16].

A segunda etapa consiste na formação efectiva da espuma por simples aquecimento do material precursor a temperaturas ligeiramente acima da

temperatura de fusão do metal. Os poros são então formados devido à decomposição térmica do agente *expansor* e à simultânea fusão do metal [6].

A expansão do material precursor pode ocorrer livremente em todas as direcções, numa só direcção quando efectuada num molde aberto ou confinada num molde fechado com a geometria da peça pretendida [17].

No final do processo, depois do arrefecimento relativamente rápido, a espuma apresenta uma estrutura celular fechada altamente porosa e uma película superficial densa que aumenta as propriedades mecânicas destes materiais.

Actualmente, as espumas de Alumínio obtidas pelo processo de P/M têm vindo a ser testadas na produção de componentes para automóveis e na indústria aeroespacial [6]. Nas Figuras 2.5 e 2.6 apresentam-se alguns exemplos de produtos fabricados por P/M.



**Figura 2.5**

**Figura 2.5**  
Produtos obtidos pelo processo de pulverotecnologia, FOAMINAL® [18].



**Figura 2.6**

**Figura 2.6**  
Produtos obtidos pelo processo de pulverotecnologia, ALUlight® [19].

Através deste processo, conseguem-se componentes de diferentes configurações e geometrias complexas. Além disso, a ligação das espumas

metálicas a outros materiais é possível durante o próprio desenvolvimento das espumas, evitando o recurso a outros processos de ligação convencionais [17].

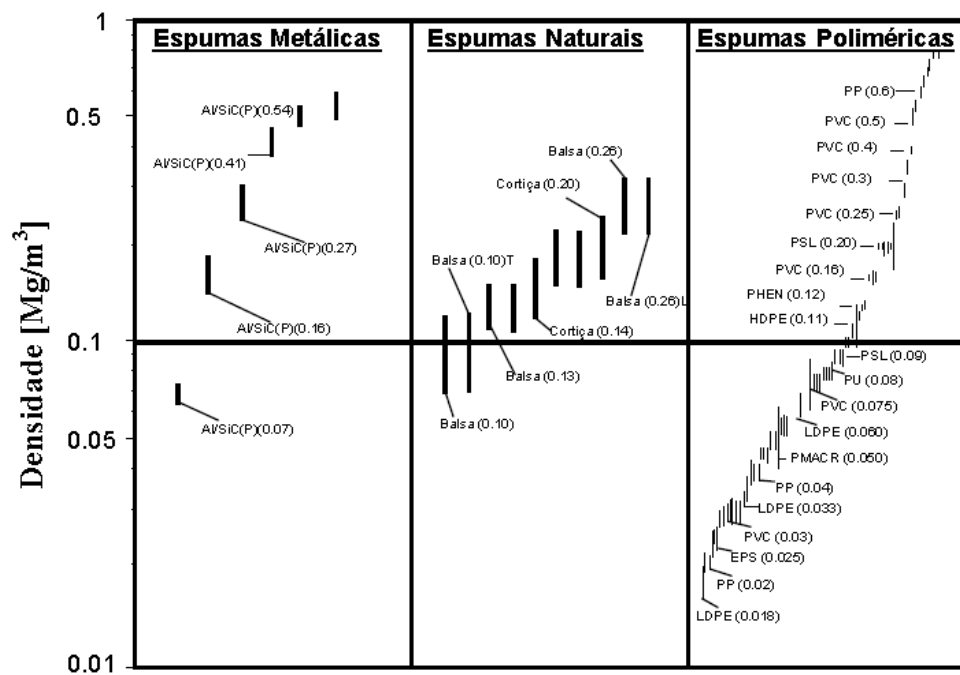
## 2.4. PROPRIEDADES

### 2.4.1. DENSIDADE RELATIVA

Traduzida pela relação entre a densidade da espuma e a densidade do material base,  $\rho^*/\rho_s$ , a densidade relativa é a propriedade mais significativa para o estudo de espumas metálicas [20].

A fracção de poros, designada por porosidade, pode ser determinada pela expressão  $1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}$  [6].

A Figura 2.7 mostra a comparação desta propriedade em espumas de diferentes tipos.



**Figura 2.7**

Comparação da densidade de diferentes espumas de estrutura fechada [6].

Embora a densidade relativa condicione fortemente outras propriedades das espumas metálicas e, conseqüentemente, as suas aplicações, trata-se de um parâmetro global que não fornece informação sobre a disposição, tamanho ou forma dos poros.

#### 2.4.2. PARÂMETROS ESTRUTURAIS

Para se caracterizar a estrutura geométrica e a microestrutura de uma espuma metálica, há que determinar e analisar outros parâmetros. Alguns deles são apresentados na Tabela 2.2.

<b>Estrutura celular = poros (células) + rede estrutural (metal base)</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Célula <ul style="list-style-type: none"> <li>Aberta</li> <li>Fechada</li> </ul> </li> <li>➤ Arranjo das células <ul style="list-style-type: none"> <li>Regular</li> <li>Irregular</li> </ul> </li> <li>➤ Relação de vizinhança</li> <li>➤ Gradiente de densidades</li> <li>➤ Composição química do material celular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✦ Fracção em volume</li> <li>✦ Factor de forma</li> <li>✦ Relação de aspecto</li> <li>✦ Orientação</li> <li>✦ Tamanho</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✧ Paredes celulares <ul style="list-style-type: none"> <li>Comprimento</li> <li>Espessura</li> <li>Curvatura</li> </ul> </li> <li>✧ Junções <ul style="list-style-type: none"> <li>Quantidade</li> <li>Área</li> </ul> </li> </ul>
	<p><b>Microestrutura</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✧ Partículas</li> <li>✧ Grãos</li> <li>✧ Estrutura dendrítica</li> <li>✧ Homogeneidade química</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✧ Eutéticos</li> <li>✧ Microporos</li> <li>✧ Inclusões <ul style="list-style-type: none"> <li>✧ Precipitados</li> <li>✧ Defeitos</li> </ul> </li> </ul>

**Tabela 2.2**  
**Lista de parâmetros que possibilitam a caracterização de uma espuma metálica**  
[5].

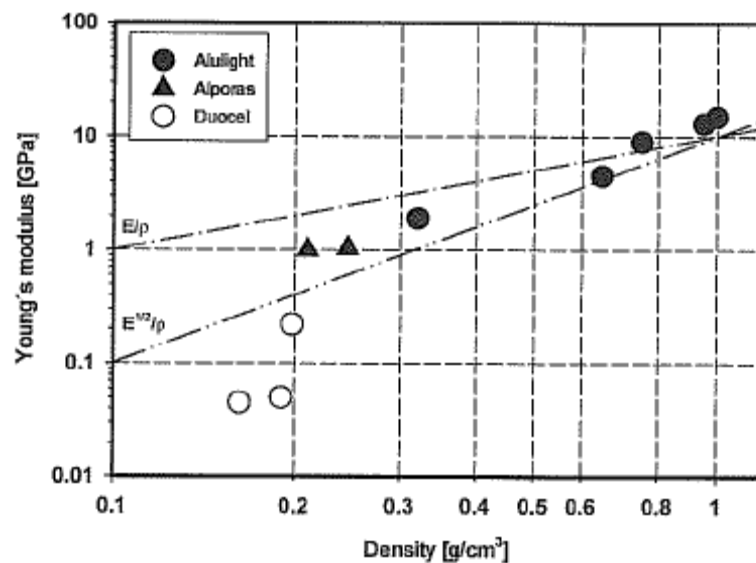
Muitos estudos efectuados sobre a estrutura celular das espumas metálicas têm-se focado no tipo de arquitectura das células ou na densidade [5]. No entanto, a caracterização das espumas é bastante mais complexa, pois todos

os parâmetros indicados na Tabela 2.2 influenciam as suas propriedades mecânicas.

### 2.4.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

#### 2.4.3.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade, também designado por módulo de Young, de um material é traduzido pela inclinação inicial da curva tensão-deformação em regime elástico e depende da estrutura celular do material. Espumas de porosidade fechada apresentam valores mais elevados comparativamente com espumas de porosidade aberta para a mesma densidade, como se pode verificar pelo gráfico da Figura 2.8 [5].



**Figura 2.8**

Módulo de Young em função da densidade relativa para diferentes tipos de espumas de Alumínio de porosidade aberta (Duocel) e fechada (Alulight e Alporas) [5].

Ainda no mesmo gráfico pode observar-se que a densidade é um dos parâmetros do qual depende o módulo de elasticidade. Os modelos matemáticos que relacionam o módulo de Young relativo  $\left(\frac{E^*}{E_s}\right)$  com a densidade da espuma encontram-se registados na Tabela 2.3, onde  $\Phi$  é a

contribuição das arestas das células,  $1 - \Phi$  é a contribuição das faces das células e o índice  $s$  diz respeito às propriedades do material base [6].

<b>Módulo de Young</b> $\left(\frac{E^*}{E_s}\right)$		
<b>Porosidade Aberta</b>	<b>Porosidade Fechada</b>	<b>Referências</b>
$\rho^2$	$\Phi^2 \rho^2 + (1 - \Phi)\rho$	Gibson and Asbhy (1982) Argumento dimensional
$\frac{\rho^2}{10 + 31\rho + 4\rho^2}$	—	[Warren and Kraynik (1988)] Tetraedro, triangular
$0.98\rho^2$	$0.35\rho$	[Warren and Kraynik (1997)] Tetradecaedro
—	$0.32\rho + 0.32\rho^2$	Simone (1997) Tetradecaedro, faces planas

**Tabela 2.3**

Modelos matemáticos para o módulo de Young das espumas metálicas [6].

Para caracterizar o comportamento linear elástico de materiais isotrópicos são necessários dois módulos: o módulo de Young, referido anteriormente, e o módulo de distorção,  $G$ . Algumas espumas são anisotrópicas devido ao processo de fabrico e, por isso, mais que dois módulos são necessários para descrever o comportamento linear-elástico. No caso de haver isotropia aplicam-se as equações já conhecidas para materiais não-celulares, relacionando o módulo de Young,  $E$ , o módulo de distorção,  $G$ , o coeficiente de Poisson,  $\nu$ , e o módulo volumétrico,  $K$  [5].

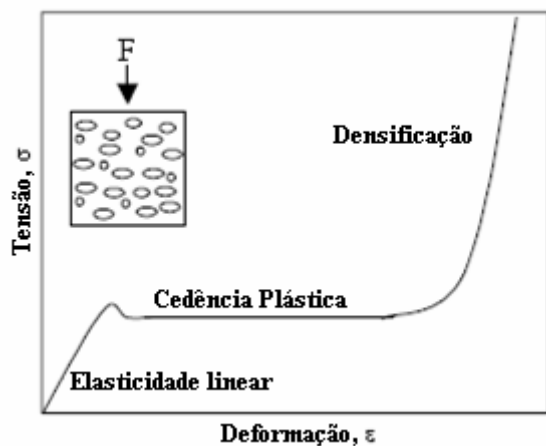
$$(2.1) \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

$$(2.2) \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}.$$

#### 2.4.3.2. COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO/TRACÇÃO

Em compressão, os materiais celulares apresentam uma curva tensão-deformação peculiar com um patamar de cedência, onde a tensão se mantém quase constante para uma elevada gama de valores de deformação. Este comportamento torna os metais celulares muito interessantes para aplicações de absorção de energia onde uma grande quantidade de deformação pode ser absorvida a uma tensão constante relativamente baixa [5].

No gráfico da Figura 2.9 estão representados os três estágios de deformação quando as espumas são submetidas a esforços de compressão uniaxial.



**Figura 2.9**

Curva típica de tensão-deformação de uma espuma metálica sujeita a compressão [6].

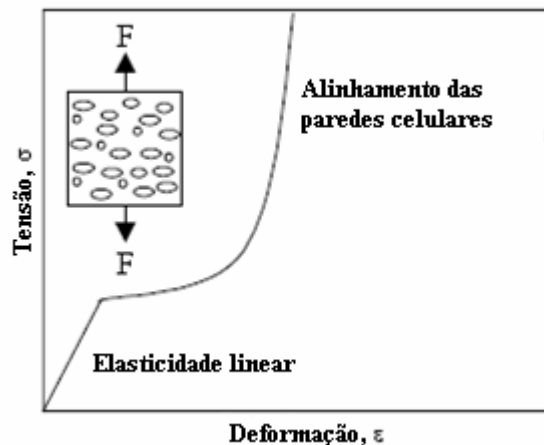
Na zona linear-elástica, os mecanismos de deformação dependem sobretudo do tipo de células (abertas ou fechadas) constituintes da espuma. Assim, no caso de espumas de porosidade aberta, a deformação deve-se à flexão das paredes celulares, enquanto que nas espumas de porosidade fechada as paredes celulares contraem.

Quando sujeitas a esforços que excedem a tensão limite de elasticidade, as espumas deformam plasticamente, tal como acontece em materiais sólidos (metais e polímeros). Esta deformação de carácter irreversível é consequência da decomposição das forças de compressão nas paredes celulares das espumas.



No último estágio de compressão, designado por *densificação*, dá-se o colapso das células. No limite, a espuma assemelha-se ao material sólido de base e o declive,  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ , permite determinar o valor do módulo de Young do material denso [6].

Quando submetidas a esforços de tracção as espumas apresentam uma resposta linear-elástica análoga à obtida em compressão. No entanto, a zona de cedência plástica não possui um patamar bem definido, verificando-se um aumento de tensão (Figura 2.10).



**Figura 2.10**

Curva típica de tensão-deformação de uma espuma metálica à tracção [6].

O comportamento das espumas em regime plástico, quando submetidas a esforços de tracção, deve-se a mudanças na estrutura celular no decorrer da aplicação da carga, em particular ao alongamento das arestas e das junções. Estes alongamentos associados à flexão originam um alinhamento das células com o eixo de aplicação do esforço, resultando num aumento de concentração de tensões que leva a uma redistribuição da tensão e, conseqüentemente, a deformações noutras zonas [21].

#### 2.4.3.3. CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA

Como foi visto anteriormente, as espumas metálicas quando comprimidas apresentam um patamar de cedência que lhes confere boa capacidade para absorver energia. A tensão de patamar, também designada por tensão de

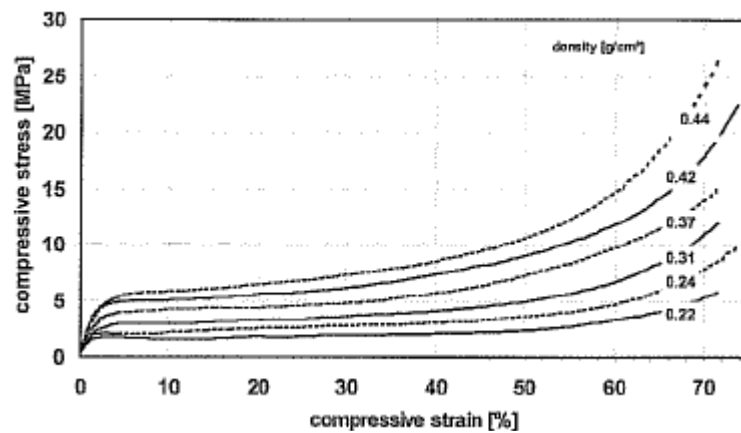
$plateau$ ,  $\sigma_{pl}$ , é portanto um parâmetro de interesse para a caracterização das espumas no que diz respeito a esta propriedade.

A tensão de  $plateau$  depende da tensão limite de elasticidade do material base,  $\sigma_{y,s}$ , e da densidade da espuma [5].

Para espumas de porosidade fechada, usando o modelo de célula cúbica de Gibson e Ashby [20], a relação entre a tensão de  $plateau$  e a tensão limite de elasticidade do material base pode ser dada pela expressão:

$$(2.3) \quad \frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{y,s}} \approx 0.3 \left( \Phi \frac{\rho}{\rho_s} \right)^{3/2} + 0.4(1 - \Phi) \frac{\rho}{\rho_s}.$$

Na Figura 2.11 estão representadas curvas tensão-deformação à compressão para diferentes densidades de espuma, observando-se que a tensão de  $plateau$  aumenta com o aumento da densidade.



**Figura 2.11**

Curvas tensão-deformação para espumas de Alumínio de diferentes densidades quando sujeitas a compressão [5].

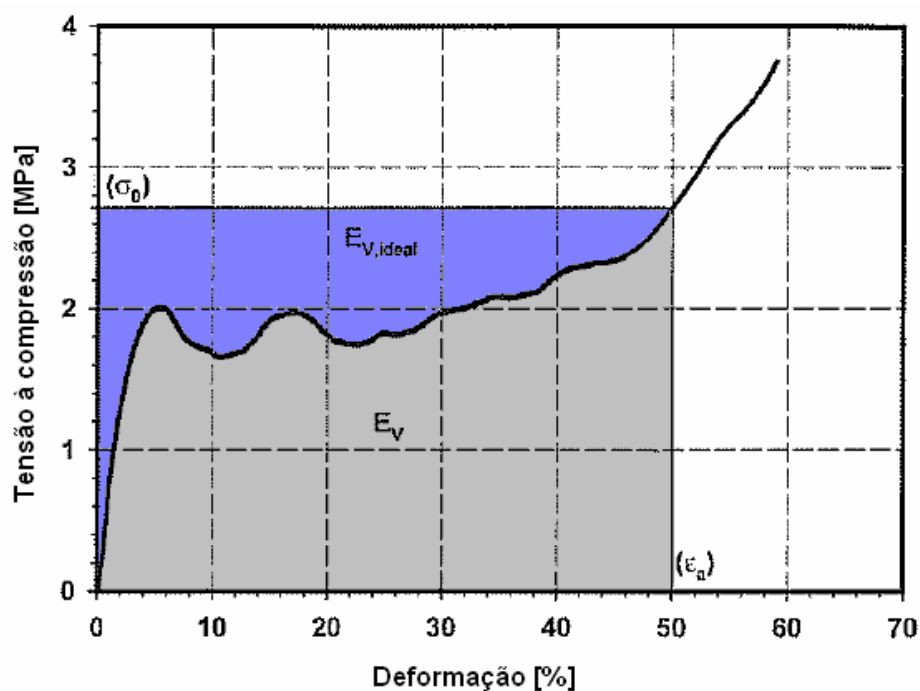
A energia absorvida por unidade de volume,  $E_V$ , num determinado intervalo de extensão,  $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$ , corresponde à área por baixo da curva tensão-deformação nesse intervalo [5], isto é,

$$(2.4) \quad E_V = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon.$$

A eficiência de absorção de energia,  $\eta$ , traduz a relação entre a energia absorvida pelo material real e a energia absorvida por um absorvedor de energia *ideal* [5].

$$(2.5) \quad \eta = \frac{E_v}{\sigma_0(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}.$$

Na Figura 2.12 estão representadas as capacidades de absorção de energia de um material real e de um material *ideal*.

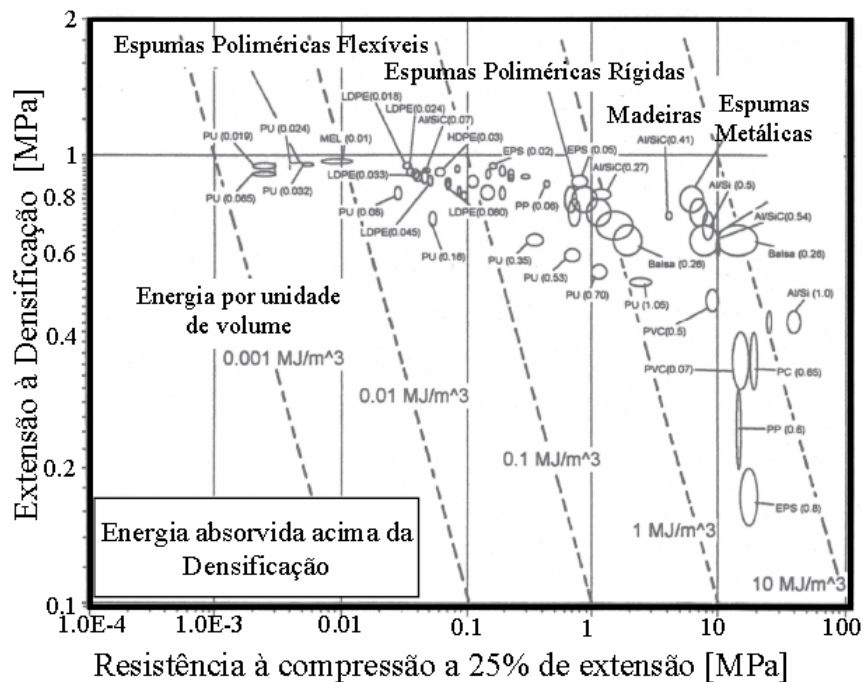


**Figura 2.12**

Comparação entre absorvedores de energia: real e *ideal* [5].

O material *ideal* caracteriza-se por atingir a tensão máxima de cedência para uma deformação de 0%, mantendo-se a tensão constante durante todo o processo de deformação.

As espumas metálicas têm vindo a mostrar uma maior capacidade de absorção e dissipação de energia comparativamente com outros tipos de espumas (Figura 2.13), pelo que poderão ser utilizadas em componentes estruturais nos veículos, para aumentar a segurança passiva dos passageiros [6].



**Figura 2.13** .  
Comparação da capacidade de absorção de energia de vários tipos de espumas [6].

No entanto, é preciso ter em atenção que para este tipo de aplicações onde se requer boa capacidade de absorção de energia ao impacto, há que considerar a velocidade a que ocorre a deformação [5].

#### 2.4.4. PROPRIEDADES TÉRMICAS

As propriedades térmicas mais relevantes para o estudo da aplicabilidade das espumas metálicas são: o ponto de fusão, o calor específico, o coeficiente de expansão térmica, a condutividade térmica, a difusibilidade térmica, a emissividade, a resistência a choques térmicos e a resistência ao fogo.

O ponto de fusão das espumas de Alumínio é idêntico ao do Alumínio que lhes deu origem. Porém, a superfície da espuma apresenta uma camada contínua de óxido, cujo ponto de fusão é consideravelmente mais elevado. A área coberta com a camada de óxido aumenta com o aumento da porosidade e diminuição do tamanho das células. O calor específico por unidade de volume,

$C_v$ , de uma estrutura celular é baixo, o que torna estes materiais interessantes para sistemas de refrigeração. O coeficiente de expansão térmico,  $\alpha$ , das espumas é quase igual ao do material base, enquanto que a sua condutividade térmica,  $\lambda$ , é significativamente mais baixa. Quanto à difusibilidade térmica, as espumas apresentam valores superiores às do metal base e, por isso, poderão ser utilizadas em permutadores de calor. A emissividade é quase sempre mais elevada do que a do material base, o que, em termos de aplicabilidade, pode ser interessante em sistemas de aquecimento/arrefecimento rápido por radiação. Finalmente, as espumas são mais resistentes a choques térmicos do que o metal base e são resistentes ao fogo, comparativamente com espumas de outros tipos, com a vantagem de não produzirem fumos tóxicos [5].

#### **2.4.5. PROPRIEDADES ACÚSTICAS**

Devido às suas propriedades acústicas, as espumas metálicas podem ser usadas para absorver som. Existem diversos modos de se dar absorção de som, sendo estes por amortecimento viscoso, mecânico ou termoplástico.

A capacidade de um material absorver som é caracterizada pelo coeficiente de absorção sonora, definido como a razão entre a intensidade de som não-reflectida na superfície do material e a intensidade incidente.

O coeficiente de absorção sonora varia com a frequência e com o ângulo de incidência da onda e em função da espessura do material, da densidade da espuma e da dimensão de célula.

Em espumas metálicas de porosidade aberta, a energia sonora é convertida em energia térmica devido à vibração da superfície das células, verificando-se uma considerável diminuição de energia sonora, a qual é reflectida no interior das células.

As espumas de porosidade fechada são demasiado rígidas para que a energia sonora se converta em energia térmica e são muito leves para serem aplicadas em painéis de ressonância [5].

#### **2.4.6. PROPRIEDADES ELÉCTRICAS**

A condutividade eléctrica das espumas metálicas, embora seja consideravelmente inferior à do metal de base, ainda é suficiente para garantir uma boa ligação à terra e fazer contactos em baixa tensão de equipamentos eléctricos. Além disso, são capazes de absorver ondas electromagnéticas.

### **2.5. ENSAIOS MECÂNICOS**

Os ensaios mecânicos permitem dar a conhecer o comportamento dos materiais quando sujeitos a esforços que podem ser de tracção, compressão, flexão, torção ou corte. Na investigação, os ensaios mecânicos constituem um meio relativamente simples de obter propriedades mecânicas importantes para comparação ou selecção de materiais [22].

#### **2.5.1. ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL**

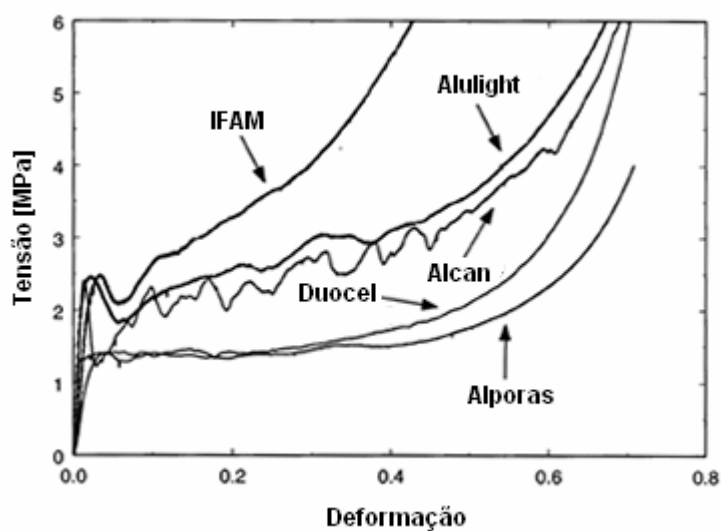
Os ensaios de compressão permitem verificar a aptidão do material para suportar grandes deformações plásticas sem atingir o colapso [23]. Os ensaios de compressão uniaxial são preferencialmente usados em perfis cilíndricos de espuma, placas ou blocos com uma relação altura/espessura superior a 1.5. A dimensão mínima do provete deve ser pelo menos sete vezes superior à dimensão da célula, de forma a evitar efeitos de tamanho [13]. Ensaios deste tipo foram já realizados em provetes cúbicos de espumas metálicas de cinco fabricantes, listados na Tabela 2.4.

Fabricante	Nome Comercial	Processo de Fabrico	Tipo de Estrutura Celular	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]
Cymat	Alcan	Expansão directa do metal fundido	Fechada	380
Shinko Wire	Alporas	Expansão directa do metal fundido	Fechada	216
ERG	Duocel	Fundição de precisão	Aberta	216
Mepura	Alulight	Pulverotecnologia	Fechada	260 - 470
Fraunhofer Institute	IFAM	Pulverotecnologia	Fechada	375 - 750

**Tabela 2.4**

Características de espumas de diferentes fabricantes [24].

O gráfico com as respectivas curvas tensão-deformação apresenta-se na Figura 2.14 e as propriedades mecânicas encontram-se na Tabela 2.5.

**Figura 2.14**

Curvas tensão-deformação de espumas de Alumínio de fabricantes distintos [24].

Espuma	N	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young [GPa]	Tensão [MPa]	Máxima deformação
Alcan	4	249	1.52	2.30	0.65
	4	212	1.18	2.34	0.66
	4	232	3.16	4.35	0.68
Alporas	4 <sup>a</sup>	250	1.00	1.84	—
	4	220	1.14	1.46	0.63
Duocel	4	217	0.634	2.17	0.63
	3	220	0.236	1.39	0.60
Alulight	5	247	1.17	3.01	0.65
IFAM <sup>b</sup>	1	376	0.61	1.88	0.61
	1	429	0.69	2.30	0.60
	1	502	0.82	2.50	0.60
	1	544	1.33	2.82	0.60

**Tabela 2.5**

Resultados dos ensaios de compressão para espumas de diferentes densidades e fabricantes distintos [24].

N, quantidade de amostras.

<sup>a</sup> Dados retirados do estudo de Andrews *et al.* [26].

<sup>b</sup> Devido a grandes variações de densidade nas amostras de espumas Fraunhofer ensaiadas, registaram-se os valores individuais em detrimento dos valores médios.

### 2.5.2. ENSAIO DE TRACÇÃO

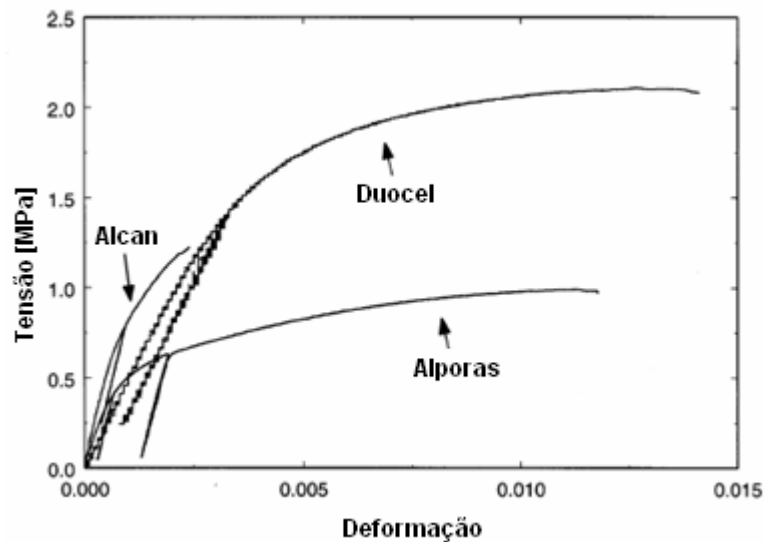
No ensaio de tracção submete-se um provete do material a ser testado a um esforço uniaxial continuamente crescente até se dar a ruptura. O registo do alongamento sofrido pelo provete é realizado no decurso do ensaio. Os provetes são geralmente normalizados [23].

Para espumas metálicas, os ensaios de tracção uniaxial são realizados em provetes cilíndricos ou em forma de *osso de cão* devendo, neste caso, ser maquinados na forma especificada na norma ASTM E8-96a, para evitar a ruptura do provete nas zonas mais críticas. A dimensão mínima do provete deve ser sete vezes superior à dimensão da célula, de forma a anular os



efeitos de dimensão. O provete pode ser fixo na máquina de ensaios por grampos convencionais ou colado com adesivos [13].

Ensaio de tracção foram realizados nas espumas Duocel, Alcan e Alporas, já mencionadas nos ensaios de compressão. O gráfico tensão-deformação para este tipo de ensaios encontra-se representado na Figura 2.15.



**Figura 2.15**

Curvas tensão-deformação de espumas de Alumínio de diferentes fabricantes submetidas a esforços de tracção [24].

Comparando os valores das tabelas 2.5 e 2.6, verifica-se que as espumas têm comportamentos mecânicos diferentes dependendo da natureza do esforço aplicado, compressão ou tracção. Por isso, é essencial escolher o tipo de ensaio mecânico a ser realizado, devendo este assemelhar-se às condições de carregamento a que o material está sujeito quando aplicado numa situação real.

Espuma	N	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young [GPa]	Tensão [MPa]	Ductilidade
Duocel	6	193	0.502	1.93	0.012
	5	190	0.184	1.08	0.024
Alcan	4	217	1.33	0.93	0.0017
Alporas <sup>a</sup>	3	244	1.37	1.44	0.012

**Tabela 2.6**

Resultados dos ensaios de tracção para diferentes espumas [24].

N, quantidade de amostras.

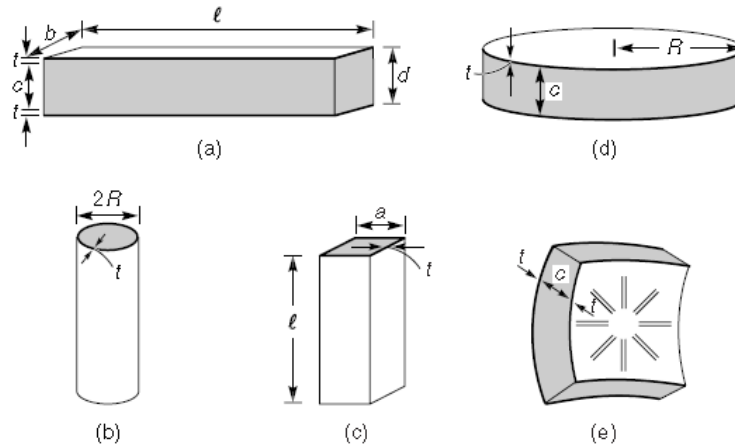
<sup>a</sup> Dados retirados do estudo de Andrews *et al.* [26] em provetes prismáticos.

A principal dificuldade neste tipo de ensaio é a fixação dos provetes à máquina de ensaios. O sistema de amarras deve garantir perfeita axialidade na aplicação da carga e não permitir, além disso, qualquer escorregamento do provete. Este aspecto da axialidade é muito importante porque qualquer desvio na linha de aplicação da carga gera uma componente de flexão que conduz a resultados erróneos, pois o estado de tensão deixa de ser apenas de tracção [23].

### 2.5.3. ENSAIO DE FLEXÃO

Espumas utilizadas em aplicações reais, na maior parte dos casos na indústria de transportes, para melhorar a capacidade de absorção de energia em barras protectoras e outros componentes estruturais, estão sujeitas não só a cargas uniaxiais mas também, muitas vezes, a flexão. Por isso, é importante ter informação sobre os modos de colapso das espumas de Alumínio e de estruturas preenchidas com espumas de Alumínio quando sujeitas a estes esforços [27].

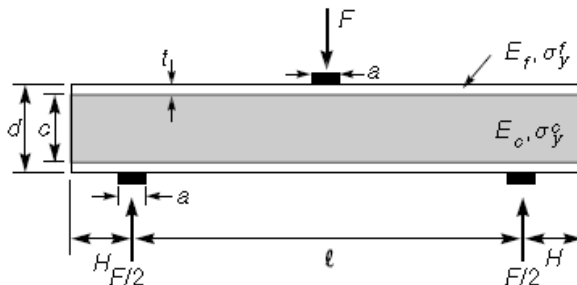
Em testes de flexão é comum utilizarem-se provetes do tipo sanduíche, que podem ser em forma de barra, coluna cilíndrica, coluna prismática, disco ou elemento de casca, como se mostra na Figura 2.16 [13].



**Figura 2.16**

Geometrias de provetes do tipo sanduíche: (a) barra, (b) coluna circular, (c) coluna prismática, (d) disco e (e) elemento de casca [13].

Considerando um ensaio de flexão em três pontos, num provete do tipo sanduíche em forma de barra (Figura 2.17), de largura constante  $b$ , com duas chapas de espessura  $t$  perfeitamente unidas ao núcleo de espuma metálica com espessura  $c$ . A distância entre apoios é  $l$  e a distância de um apoio ao limite do provete é  $H$ . A designação  $f$  diz respeito às chapas,  $c$  ao núcleo em espuma metálica e  $s$  ao sólido de base do núcleo [13].



**Figura 2.17**

Sanduíche em forma de barra, submetida a flexão em três pontos [13].

O módulo de Young do núcleo e o módulo de distorção são dados pelas expressões [20]

$$(2.6) \quad E_c^* = C_1 E_s \left( \frac{\rho_c^*}{\rho_s} \right)^2$$

e

$$(2.7) \quad G_c^* = C_2 E_s \left( \frac{\rho_c^*}{\rho_s} \right)^2.$$

A deflexão,  $\delta$ , causada pelo punção superior em relação aos punções inferiores é dada pela expressão

$$(2.8) \quad \delta = \frac{Fl^3}{48(EI)_{eq}} + \frac{Fl}{4(AG)_{eq}},$$

onde  $F$  é a força total, a rigidez equivalente de flexão é  $(EI)_{eq} \approx \frac{E_f b t d^2}{2}$  e a rigidez equivalente de corte é  $(AG)_{eq} \approx bc G_c$ . As tensões de flexão na chapa e no núcleo são

$$(2.9) \quad \sigma^f = \frac{ME_f}{(EI)_{eq}} y$$

e

$$(2.10) \quad \sigma^c = \frac{ME_c}{(EI)_{eq}} y,$$

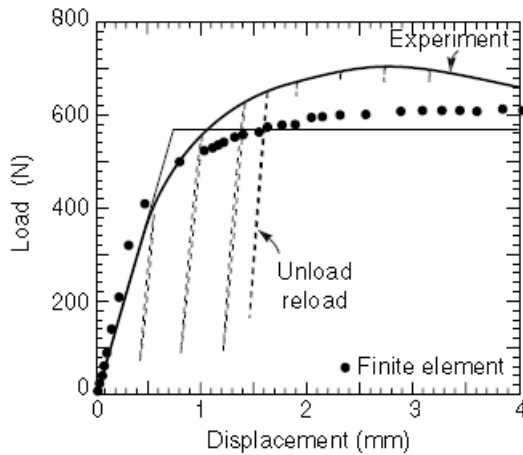
onde  $M$  é o momento na secção útil do provete e  $y$  a distância ao eixo neutro. O momento máximo é dado por [13]

$$(2.11) \quad M = \frac{Fl}{4}.$$

O colapso de barras em sanduíche pode ocorrer de acordo com os três mecanismos seguintes [28]:

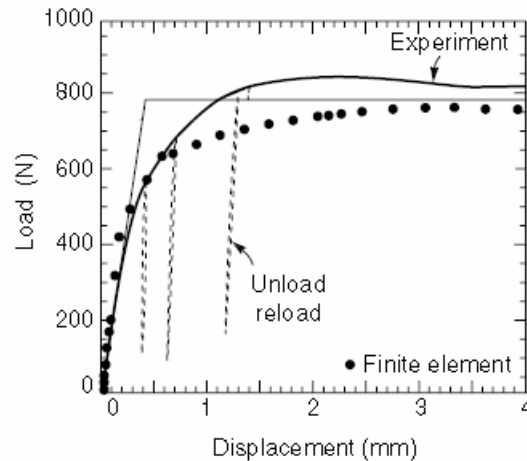
- ✦ Colapso das chapas, se a tensão limite de elasticidade destas for inferior à do núcleo;
- ✦ Colapso por indentação, se o punção penetra na chapa provocando deformação plástica;
- ✦ Colapso do núcleo, devido à presença de tensões de corte na espuma.

Curvas típicas força-deslocamento para ensaios de flexão em três pontos estão representadas nas Figuras 2.18 e 2.19.



**Figura 2.18**

Curva força-deslocamento em placas sanduíche sujeitas a flexão em três pontos, colapso do núcleo [13].



**Figura 2.19**

Curva força-deslocamento em placas sanduíche sujeitas a flexão em três pontos, colapso por indentação [13].

Além dos ensaios mecânicos já referidos, as espumas metálicas podem ser testadas à fadiga, à fluência, à torção ou ao corte, etc.

## 2.6. APLICAÇÕES

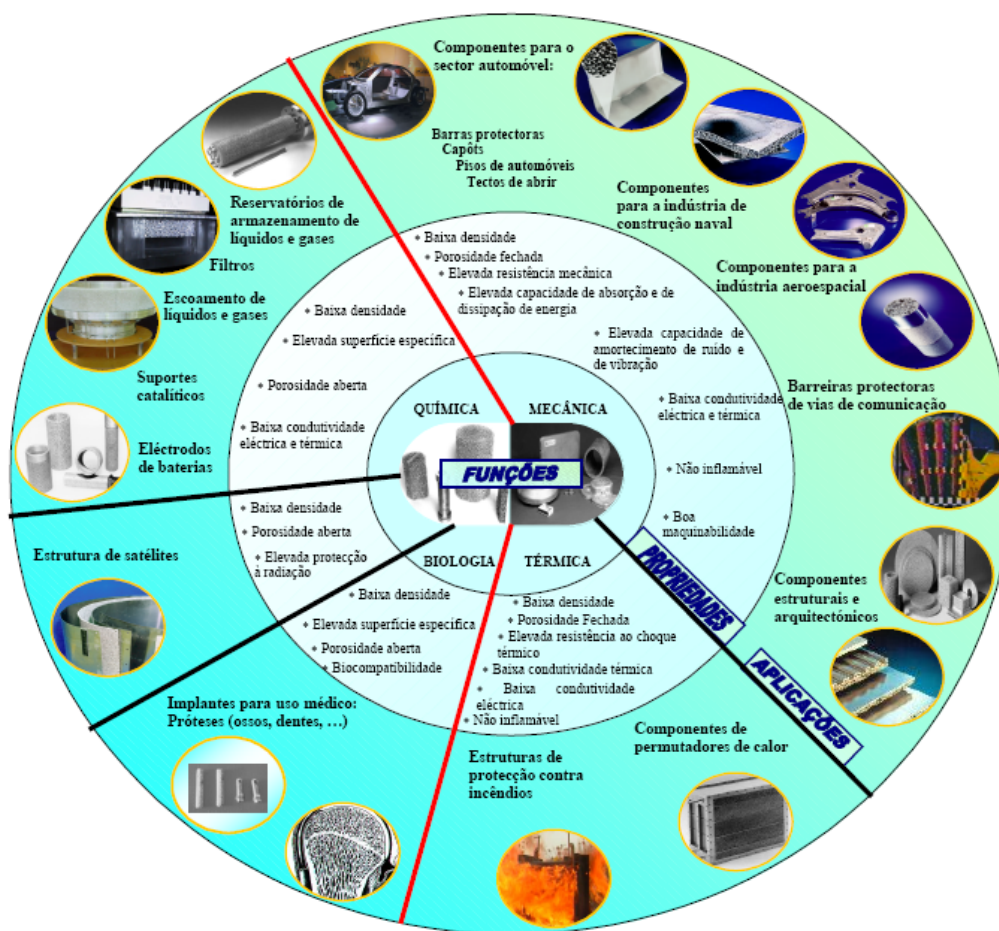
O número de possíveis aplicações de espumas metálicas tem vindo a aumentar nos diferentes sectores industriais à medida que as suas propriedades (físicas, químicas, térmicas, mecânicas, etc.) vão sendo avaliadas [6].

A viabilidade da utilização de espumas metálicas para solucionar um dado problema depende de vários factores, tais como [5]:

- Morfologia: tipo de estrutura celular (aberta/fechada), percentagem de porosidade, tamanho dos poros, densidade relativa.
- Metalurgia: metal, liga, ou microestrutura pretendida.

- Processo de fabrico: necessidade de operações secundárias tais como: maquinagem, corte, soldadura, revestimento, colagem, etc.
- Economia: custos associados, susceptibilidade de produção em larga escala.

As principais aplicações das espumas estão relacionadas, sobretudo, com a sua estrutura celular, como se mostra na Figura 2.20, e podem ser subdivididas em aplicações funcionais e aplicações estruturais [5].



**Figura 2.20**  
Principais aplicações das espumas metálicas [6].

As espumas de porosidade aberta têm aplicações maioritariamente funcionais. Graças à boa capacidade filtrante, boa retenção de partículas e resistência à corrosão, as espumas de Alumínio de porosidade aberta são utilizadas em filtros. Pelas suas características térmicas e resistência ao fogo, são utilizadas

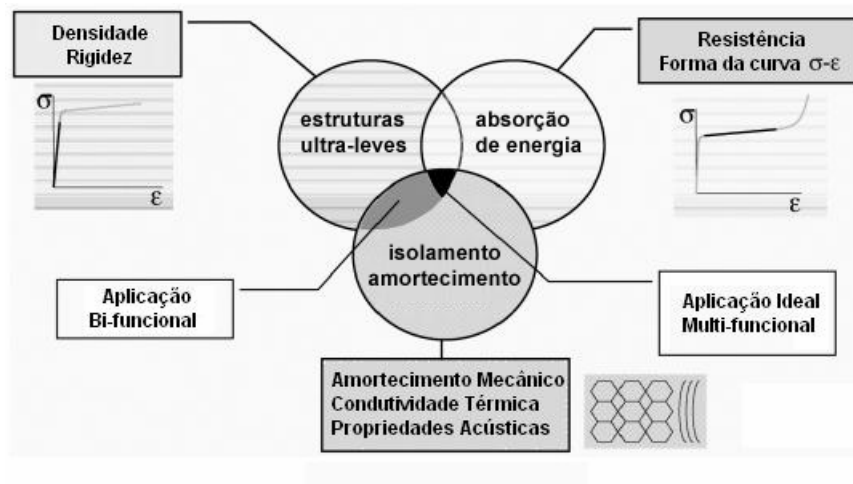
em permutadores de calor por serem boas condutoras, e em estruturas de protecção contra incêndio porque, além de serem resistentes à chama, não emitem fumos tóxicos. Outra funcionalidade é o armazenamento e transferência de líquidos, onde possibilitam maior capacidade de armazenamento de fluidos e menor desgaste. Também se têm aplicado espumas na produção de componentes auto-lubrificantes. E, entre muitas outras aplicações, são utilizadas em sistemas de amortecimento de som e vibrações [5].

Por outro lado, as espumas de porosidade fechada, em particular as espumas de ligas de Alumínio, são mais utilizadas em aplicações estruturais, principalmente no domínio da indústria de transportes [6].

### **2.6.1. INDÚSTRIA AUTOMÓVEL**

Metais e ligas leves têm vindo a ser usados para reduzir o peso dos veículos. Peso reduzido em alguns componentes ajuda a melhorar o desempenho do automóvel. Ao mesmo tempo que se deseja ter um veículo mais leve e, consequentemente, com consumos mais baixos, adicionam-se equipamentos de protecção, componentes de eliminação de vibrações, entre outros, que aumentam o peso do automóvel.

As espumas metálicas de porosidade fechada revelam-se interessantes para estas aplicações, por combinarem propriedades como baixo peso e elevada rigidez, boa capacidade de absorção de energia e amortecimento de som e vibrações (Figura 2.21). Preferencialmente na forma de painéis do tipo sanduíche, estas espumas podem ser utilizadas nos painéis do piso e do tecto, nas barras protectoras frontais e laterais, nas estruturas de reforço da carroçaria, nos *capots*, etc. (Figuras 2.22 e 2.23).



**Figura 2.21**  
Potenciais aplicações das espumas metálicas no sector automóvel [29].

Além disso, o próprio processo de fabrico permite a obtenção de componentes tridimensionais com geometria complexa, o que é uma vantagem em relação às estruturas em favo de mel, e possibilita a redução do número de componentes [6].



**Figura 2.22**

**Figura 2.22**  
Estrutura de absorção de impacto, ALULight® [19].



**Figura 2.23**

**Figura 2.23**  
Conceito de *design* de um veículo ultra-leve, Karmann [32].

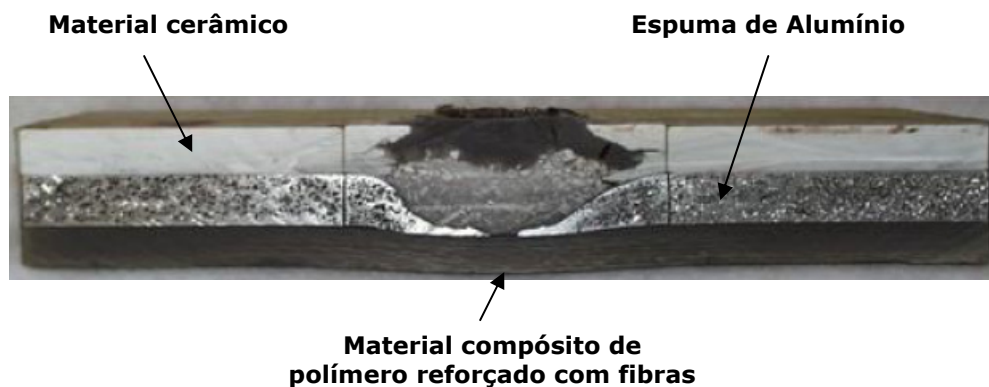


### 2.6.2. OUTRAS INDÚSTRIAS

Nas indústrias ferroviária, de construção naval e aeroespacial, painéis do tipo sanduíche têm vindo a ser testados para substituir estruturas do tipo favo de mel.

As potenciais aplicações das espumas metálicas na construção naval são: plataformas elevatórias, anteparas estruturais, plataformas de antena e compartimentos pirotécnicos. Na indústria aeroespacial estas estruturas são aplicadas na produção de vedantes e pás de turbinas [6].

Agências militares dos Estados Unidos da América e de outros países têm testado painéis do tipo sanduíche, com núcleo de espuma de Alumínio de porosidade fechada, em veículos blindados verificando que as espumas aumentam a eficiência da componente cerâmica, atrasam e atenuam a onda de choque provocada pelos projecteis e reduzem a deflexão e os danos em materiais compósitos (Figura 2.24) [33].



**Figura 2.24**

Blindagem em sanduíche com núcleo de espuma de Alumínio [33].

### 3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1. ENSAIOS MECÂNICOS

Neste trabalho, foram realizados ensaios de compressão e de flexão, de forma a identificar os mecanismos de deformação responsáveis pelo comportamento das espumas e a sua correlação com as propriedades mecânicas, em diferentes condições de ensaio.

##### 3.1.1. COMPRESSÃO DE AMOSTRAS DE GEOMETRIA CILÍNDRICA

###### 3.1.1.1. MATERIAL

Para estes ensaios foram utilizados três grupos de 5 amostras de espumas de Alumínio de geometria cilíndrica, com 31 mm de diâmetro e 33 mm de altura, aproximadamente, obtidas pelo processo de pulverotecnologia. A cada grupo de 5 amostras corresponde um tipo de espumas de Alumínio diferente, sendo:

Grupo I – Espumas de liga AlSi7 fabricadas usando pré-formas de material precursor de geometria cilíndrica;

Grupo II – Espumas de liga AlSi7 fabricadas usando aparas de material precursor de geometria não-definida;

Grupo III – Espumas de liga Al 6061 fabricadas usando pré-formas de material precursor de geometria cilíndrica.

###### 3.1.1.2. METODOLOGIA

Começou por se determinar as dimensões de cada amostra, diâmetro e altura médios, com base em três medições por parâmetro, efectuadas com um paquímetro digital MYTUTOYO modelo CD-15CP, e calculou-se o volume pela

expressão  $V = \frac{1}{4} \cdot H \cdot D^2$ .

Posteriormente, pesaram-se as amostras numa balança electrónica digital (A&D Instruments) com capacidade máxima de 210 g e mínima de 10 mg (erro = 1 mg, desvio = 0.1 mg) e registaram-se os valores.

Determinou-se a densidade (massa volúmica) como  $\rho = \frac{m}{V}$ .

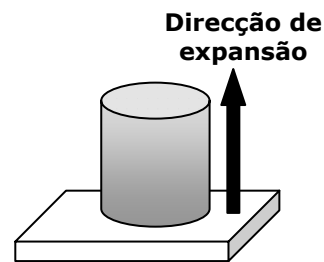
Seguidamente, realizaram-se ensaios de compressão uniaxial recorrendo a uma máquina universal de ensaios mecânicos *Shimadzu AG-50kNG* com uma célula de carga de 50 kN (Figura 3.1), tendo em atenção a colocação das amostras no tabuleiro da máquina, já que estas se encontravam referenciadas de acordo com a direcção de expansão (Figura 3.2).



**Figura 3.1**

**Figura 3.1**

Máquina universal de ensaios mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



**Figura 3.2**

Colocação das amostras na máquina de ensaios.

Foram então definidos cinco valores de deslocamento (1, 2, 4, 8 e 16 mm), correspondendo a diferentes zonas da curva global força-deslocamento. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de deformação de 1 mm/min e à temperatura ambiente, até serem atingidos os respectivos valores de deslocamento, para os três grupos de amostras.

Os valores da força e do deslocamento foram registados por *software* próprio. Depois de ensaiadas, as amostras foram cortadas por electroerosão por fio para posterior observação e análise da estrutura celular.

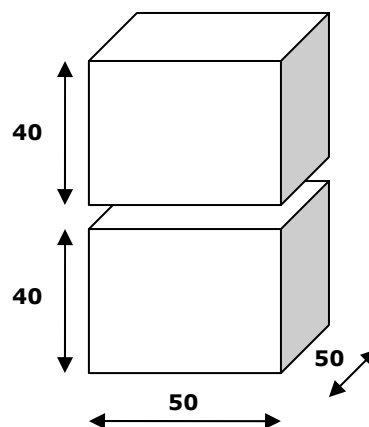
### 3.1.2. COMPRESSÃO DE AMOSTRAS DE GEOMETRIA PARALELEPÍPÉDICA

#### 3.1.2.1. MATERIAL

Para estes ensaios, 4 amostras de espumas de liga AlSi7, obtidas pelo processo de P/M, de dimensões aproximadas 50x50x80 [mm<sup>3</sup>] foram cortadas por electroerosão por fio no sentido transversal (Figuras 3.3 e 3.4). Desta forma, foi possível fazer ensaios em 8 amostras.



**Figura 3.3**  
Amostras de espumas de Alumínio antes do corte.



**Figura 3.4**  
Esquema da geometria das amostras após o corte.

#### 3.1.2.2. METODOLOGIA

A caracterização das amostras no que diz respeito ao cálculo da densidade, foi efectuada de acordo com o subcapítulo anterior mas, neste caso, o volume é dado pela expressão

$$V = \text{comprimento} \times \text{largura} \times \text{altura}.$$

Após a caracterização dimensional, foram realizados ensaios de compressão uniaxial, à temperatura ambiente, numa máquina universal de ensaios

mecânicos, às velocidades de deformação de 1, 10, 20 e 40 mm/min (duas amostras para cada velocidade), até valores de carga da ordem dos 45 kN.

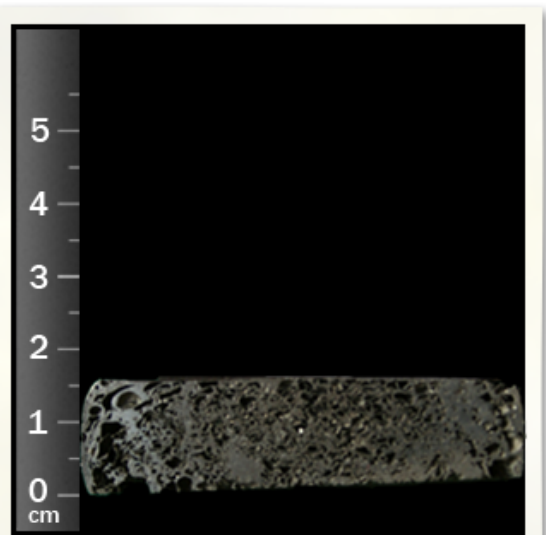
Na Figura 3.5 mostra-se um provete no início do ensaio e, na Figura 3.6, a sua secção transversal após a compressão.



**Figura 3.5**

**Figura 3.5**

Provete de espuma de Alumínio antes de ser aplicado o esforço.



**Figura 3.6**

**Figura 3.6**

Secção transversal do provete de espuma de Alumínio após a compressão.

### 3.1.3. ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

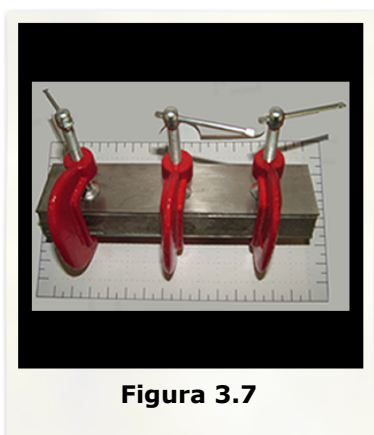
#### 3.1.3.1. MATERIAL

Nestes ensaios foram utilizadas 8 amostras de espumas de liga AlSi7 com dimensões de 140x33x15 mm<sup>3</sup>, aproximadamente, produzidas por P/M em barras com comprimento de 357 mm, e com largura e espessura iguais às das amostras. Para formar provetes do tipo sanduíche foram utilizadas 16 chapas de aço AISI 304, esmeriladas, com espessura de 1.2 mm e com a mesma largura e comprimento das amostras de espumas.

### 3.1.3.2. METODOLOGIA

Poliram-se os provetes e as chapas de aço com lixa de água de grão 220, para tornar as superfícies mais regulares e remover impurezas.

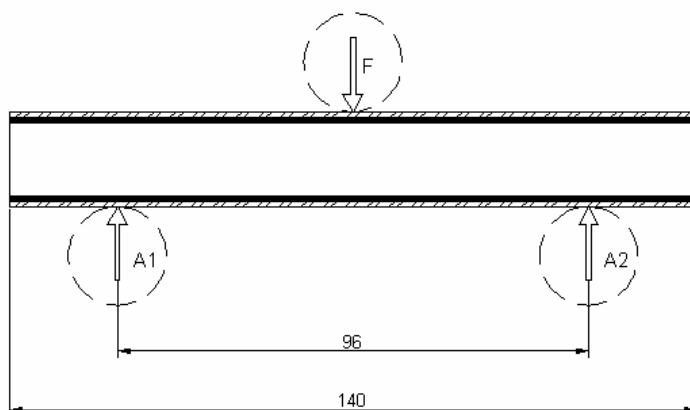
Depois de bem limpas com acetona, aplicou-se uma camada fina de *Araldite Standard* nas superfícies a colar, de forma a ter um provete do tipo sanduíche. Para garantir a colagem, comprimiram-se os provetes com grampos (Figura 3.7) deixando curar a cola à temperatura ambiente durante cerca de 48 horas.



**Figura 3.7**

Provete do tipo sanduíche durante o processo de cura da cola.

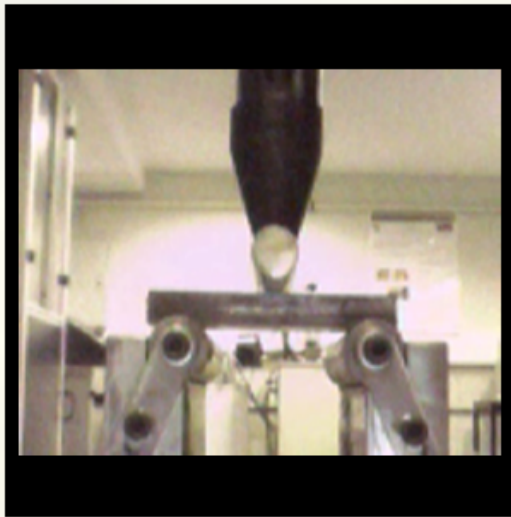
Antes de realizar os ensaios de flexão, marcaram-se nos provetes a zona de aplicação do esforço (central) e a localização de um dos apoios, para facilitar a colocação dos provetes na máquina universal de ensaios mecânicos, onde previamente havia sido montado o sistema de apoios e punção específicos para este tipo de ensaio (Figura 3.8).



**Figura 3.8**

Representação da posição do provete para início de ensaio.

Os ensaios foram realizados às velocidades de 1, 10, 20 e 40 mm/min, dois provetes por velocidade. Nas Figuras 3.9 e 3.10 mostra-se o provete do tipo sanduíche no início do ensaio de flexão e depois de fracturado.



**Figura 3.9**

**Figura 3.9**  
Início do ensaio de flexão.



**Figura 3.10**

**Figura 3.10**  
Provette fracturado após ensaio de flexão.

## **3.2. OBSERVAÇÃO E ANÁLISE**

Para analisar a estrutura celular das amostras de geometria cilíndrica (tamanho médio de poros, paredes celulares, gradientes de densidade, etc.) recorreu-se a métodos de captura de imagem – fotografia e microscopia óptica.

### **3.2.1. FOTOGRAFIA**

As imagens fotográficas foram adquiridas pelas máquinas fotográficas digitais FUJIFILM S7000 e CANON EOS350 D com uma objectiva CANON MACRO LENS EF 100mm 1:2.8.

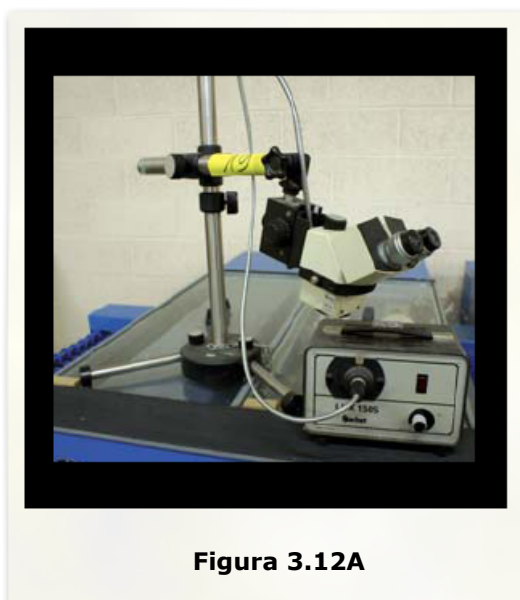
### 3.2.2. MICROSCOPIA ÓPTICA

No que diz respeito às imagens de microscopia óptica, foram adquiridas por uma câmara JVC TK-C1380 de ½" acoplada quer ao microscópio óptico LEICA DMLM (Figura 3.11), com objectivas N PLAN de 5x/0.12, 10x/0.25, 20x, 50x e 100x quer a uma lupa Nachet NS50 (Figura 3.12) com adaptador próprio para a câmara e fonte luminosa externa.

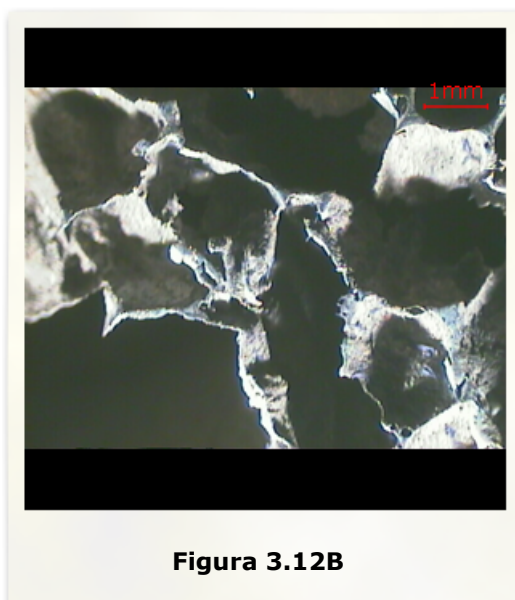
Para a captura e análise de imagem foi utilizado um *software* próprio para este efeito.



**Figura 3.11**  
Microscópio óptico LEICA DMLM 34.



**Figura 3.12A**



**Figura 3.12B**

**Figura 3.12**  
A) Lupa Nachet NS50 com fonte luminosa externa [35] B) Imagem obtida com a lupa.



É importante referir que as amostras antes de terem sido observadas nos microscópios foram polidas com lixas de grão 1000 e 2400, e com pano de polimento com pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$ .

## **4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1. COMPRESSÃO DE AMOSTRAS DE GEOMETRIA CILÍNDRICA**

As espumas de Alumínio utilizadas neste trabalho de investigação, obtidas por pulverotecnologia, não são homogêneas devido ao próprio processo de fabrico, apresentando diferentes valores de densidade, forma e orientação dos poros. Além disso, a presença de defeitos nas paredes celulares e/ou na película exterior, pode influenciar determinantemente o desenvolvimento de bandas de deformação.

Estes ensaios foram realizados, de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 3.1.1, com o objectivo de observar as modificações na estrutura celular de três tipos de espumas de Alumínio, em diferentes zonas das respectivas curvas globais força-deslocamento. Como resultado da aplicação do esforço, podem identificar-se deformações locais e bandas de deformação, assim como os mecanismos de deformação dos poros.

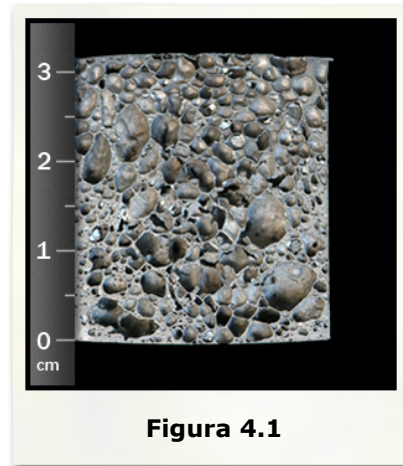
Seguidamente, apresentam-se as principais características das espumas utilizadas neste trabalho de investigação. A densidade média, para cada um dos três tipos de espumas, foi calculada a partir dos valores de cinco amostras, determinados de acordo com a metodologia descrita no subcapítulo 3.1.3.2.

#### **4.1.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA CELULAR DAS AMOSTRAS**

Tipo I – Amostras da liga AlSi7 fabricadas usando pré-formas de material precursor de geometria cilíndrica

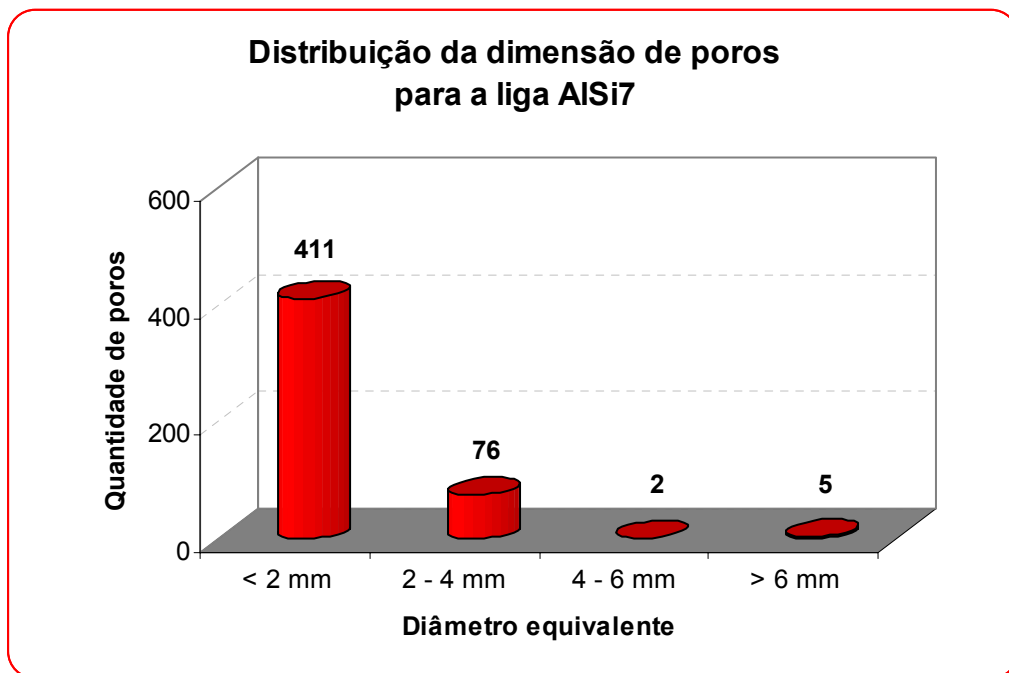
As amostras deste tipo possuem uma densidade média de, aproximadamente,  $0.58 \text{ g/cm}^3$  (desvio padrão de  $0.028 \text{ g/cm}^3$ ). Observa-se pela Figura 4.1 que os poros não têm a mesma dimensão e que, tendencialmente, o diâmetro equivalente diminui ao longo da direcção de expansão. A distribuição da dimensão dos poros encontra-se representada no gráfico da Figura 4.2, e foi

obtida através de técnicas de análise de imagem numa área aproximada de 925 mm<sup>2</sup>.



**Figura 4.1**

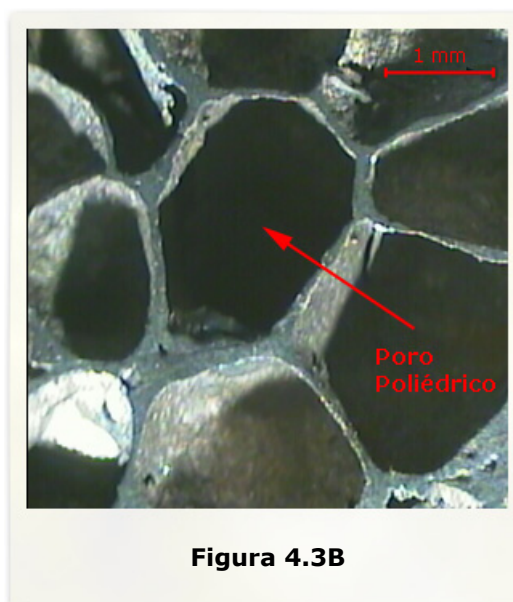
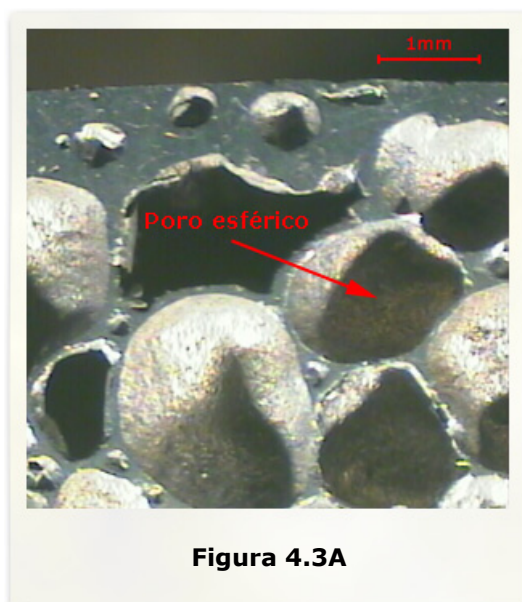
**Figura 4.1**  
Amostra de referência da Liga AlSi7.



**Figura 4.2**  
Distribuição da dimensão de poros para a amostra de referência da liga AlSi7.

As imagens ampliadas da secção transversal da amostra (Figura 4.3) revelam a presença de poros com geometrias distintas – evidenciando-se a esférica e a

poliédrica – e de pequenas porosidades na película exterior densa que este tipo de espumas possui.

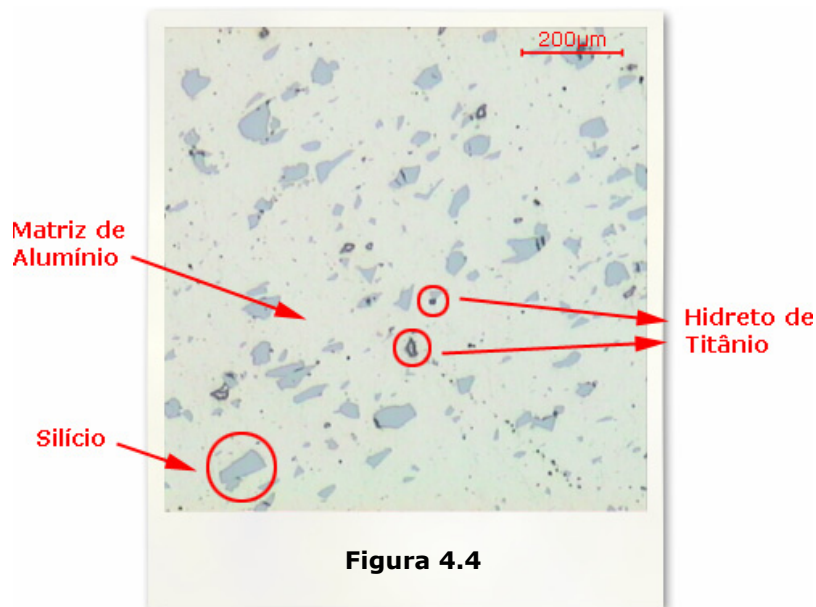


**Figura 4.3**

Diferentes geometrias dos poros: A) poro esférico B) poro poliédrico.

A distribuição e a geometria dos poros estão relacionadas com o processo de expansão nas espumas. Inicialmente, os poros crescem em raio tornando-se esféricos. Depois, à medida que a percentagem de porosidade aumenta, a geometria modifica-se formando poliedros. Após atingir a expansão máxima, a espuma inicia o seu colapso, dando origem a poros irregulares e de grande dimensão.

O crescimento dos poros ocorre de forma não-uniforme, resultando em espumas anisotrópicas [6]. Esta anisotropia é provavelmente causada pela presença de aglomerados de agente *expansor* na matriz de Alumínio do material precursor. Além disso, como se pode visualizar na Figura 4.4, a distribuição do Silício e do Hidreto de Titânio na matriz metálica não é homogênea, proporcionando a formação de estruturas celulares únicas.



**Figura 4.4**  
Amostra do material precursor observada ao microscópico.

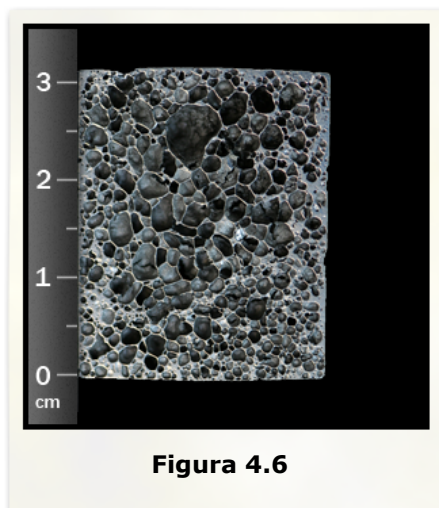
O processo de expansão das espumas depende também das velocidades de aquecimento e de arrefecimento do material precursor que lhes dá origem. O aparecimento de imperfeições nas paredes celulares, como poros e fendas de pequena dimensão (Figura 4.5), acontece possivelmente durante a etapa de arrefecimento, onde a espuma semi-líquida, formada a uma temperatura próxima da temperatura de fusão do metal constituinte da matriz, é arrefecida bruscamente até atingir a temperatura ambiente.



**Figura 4.5**  
Presença de imperfeições nas paredes celulares de uma amostra de espuma observada ao microscópico.

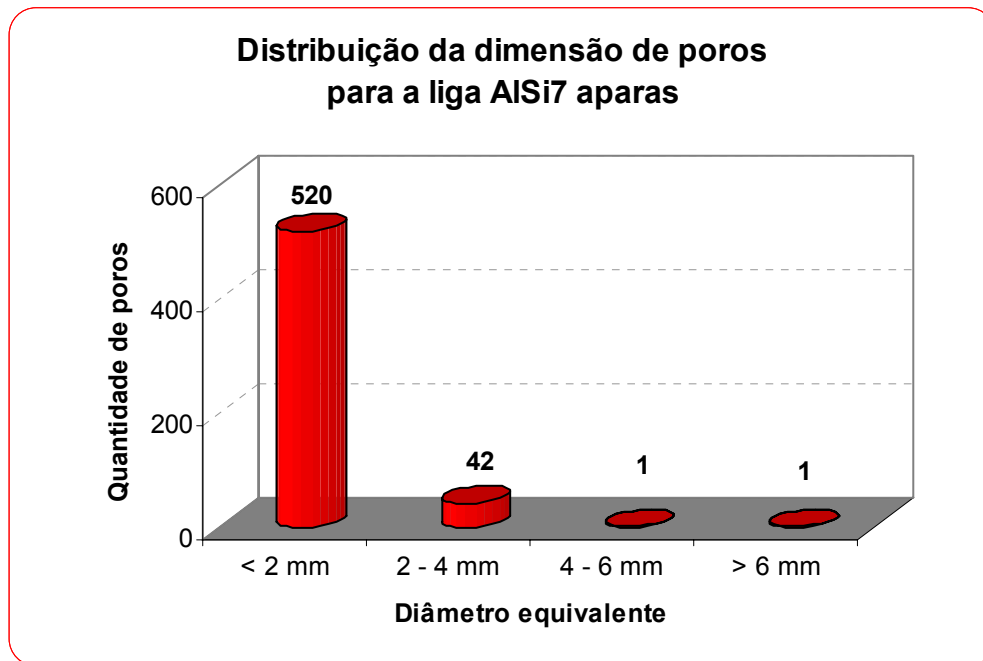
### Tipo II – Amostras da liga AlSi7 fabricadas usando pré-formas de material precursor de geometria não-definida

Para este tipo de espumas, a densidade média apresenta um valor inferior às do tipo I, sendo aproximadamente  $0.45 \text{ g/cm}^3$  (desvio padrão de  $0.050 \text{ g/cm}^3$ ). A diferente geometria de poros (esférica ou poliédrica) está relacionada com os mesmos mecanismos de expansão descritos para o tipo I. Observa-se na Figura 4.6 que, contrariamente às espumas fabricadas usando pré-formas de material precursor cilíndricas, a distribuição da dimensão dos poros aumenta com a direcção de expansão.



**Figura 4.6**  
Amostra de referência da liga AlSi7 Aparas.

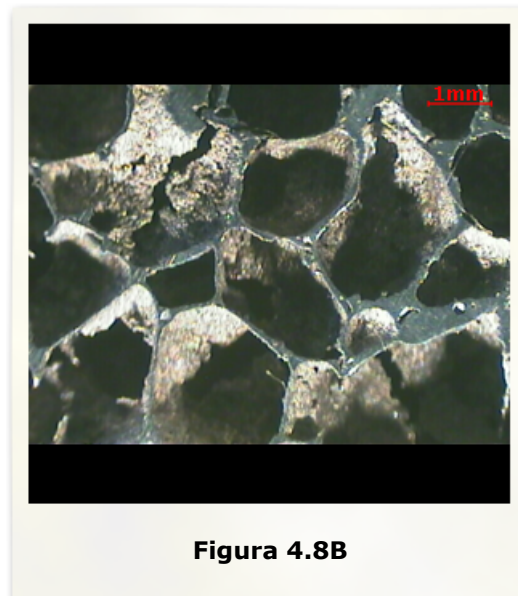
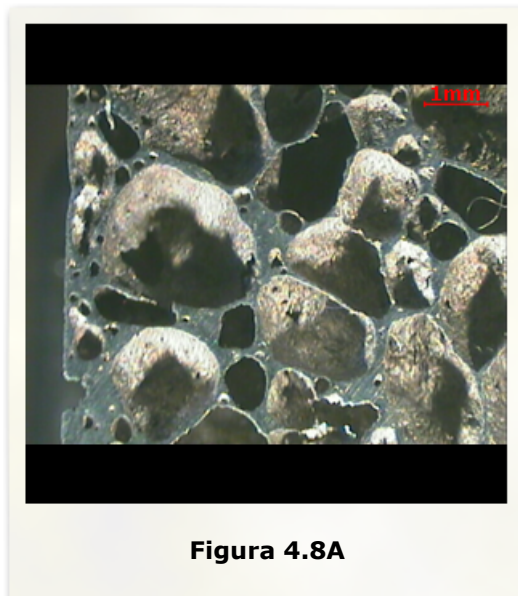
Mais se verifica que existe uma maior quantidade de poros com diâmetro inferior a 2 mm e uma menor quantidade com diâmetros superiores (gráfico da Figura 4.7). Estes valores foram obtidos para uma área aproximada de  $796 \text{ mm}^2$ .



**Figura 4.7**

Distribuição da dimensão de poros para a amostra de referência da liga AlSi7 Aparas.

A película exterior densa e as paredes celulares apresentam imperfeições, pequenas porosidades e fissuras (Figura 4.8).

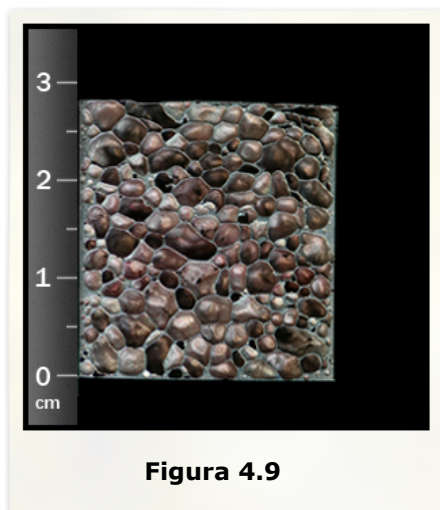


**Figura 4.8**

Presença de pequenas porosidades e fissuras A) película exterior B) paredes celulares.

Tipo III – Amostras da liga Al 6061 fabricadas usando pré-formas de material precursor de geometria cilíndrica

Para espumas desta liga de Alumínio, com densidade média de aproximadamente  $0.56 \text{ g/cm}^3$  (desvio padrão de  $0.031 \text{ g/cm}^3$ ), não é perceptível a influência da direcção de expansão na dimensão dos poros, como se pode verificar na Figura 4.9.

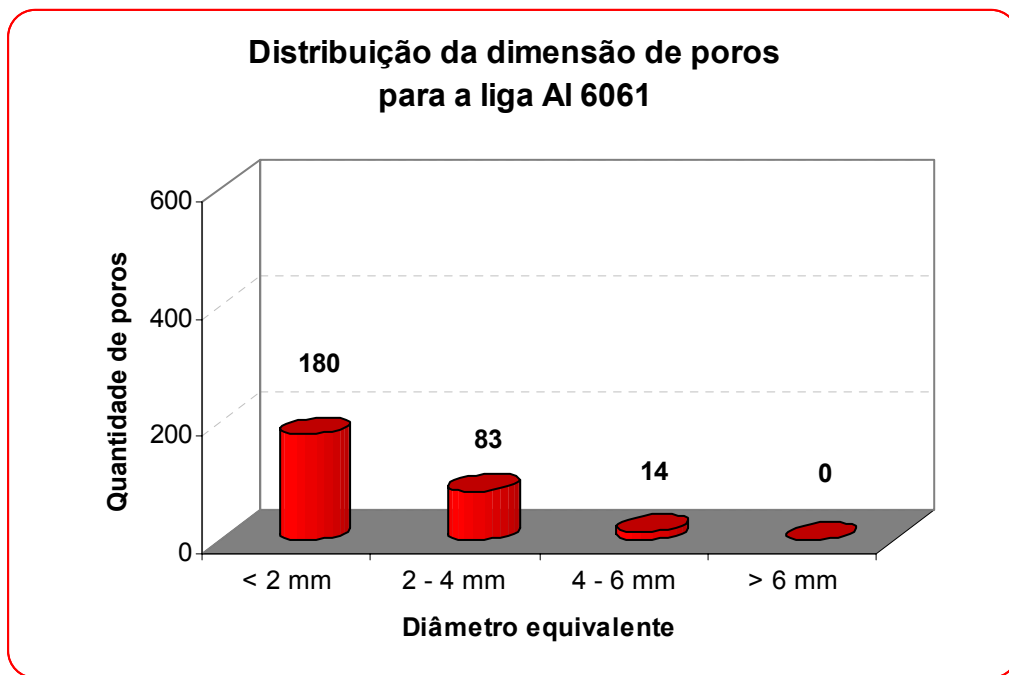


**Figura 4.9**  
Amostra de referência da liga Al 6061.

Os poros apresentam, maioritariamente, geometria esférica ou poliédrica mas, de uma forma geral, a estrutura celular parece mais estável do que as observadas para a liga AlSi7, talvez por possuir menor quantidade de poros com diâmetro inferior a 2 mm. A distribuição da dimensão dos poros está representada graficamente na Figura 4.10, tendo sido obtida para uma área de aproximadamente  $766 \text{ mm}^2$ .

Na película exterior e nas paredes celulares observam-se pequenas porosidades e imperfeições (Figura 4.11), mas muito mais subtis quando comparadas com as das amostras dos outros dois tipos.





**Figura 4.10**

Distribuição da dimensão de poros para a amostra de referência da liga Al 6061.



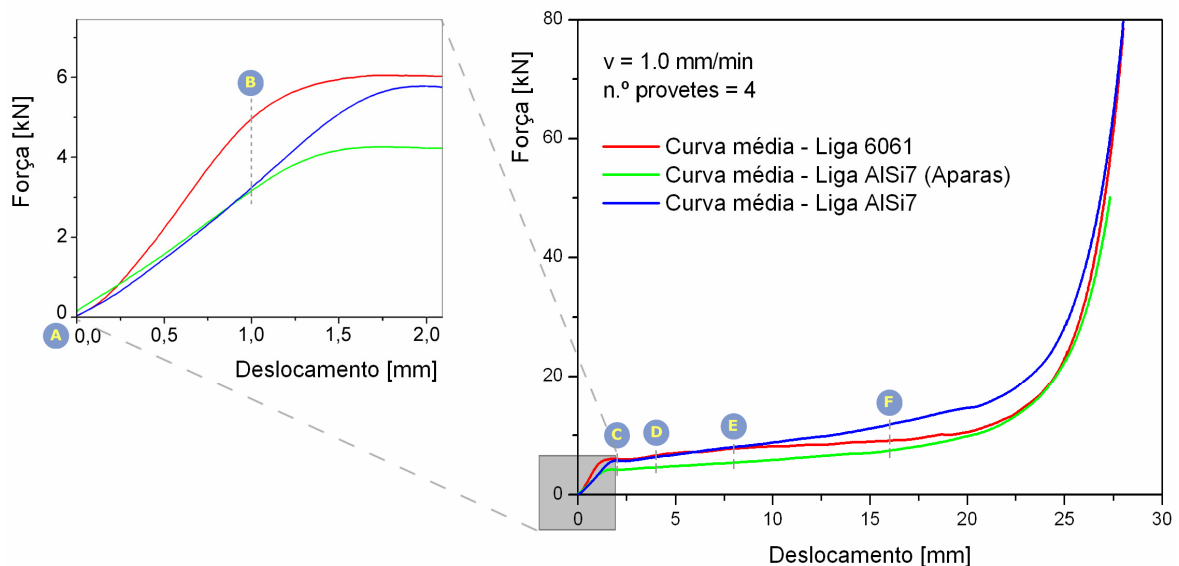
**Figura 4.11**

A) Presença de microporos e fissuras na película exterior B) presença de microporos nas paredes celulares.

#### 4.1.2. COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO

Como foi exposto no subcapítulo 3.1.1.2, diferentes amostras dos três tipos de espumas foram submetidas a esforços de compressão até serem atingidos deslocamentos de 1, 2, 4, 8 e 16 mm, a uma velocidade de deformação de 1 mm/min. Curvas globais típicas força-deslocamento são apresentadas na Figura 4.12, sendo possível identificar três regiões distintas – região linear-elástica; patamar de cedência e densificação – associadas a mecanismos de deformação diferentes. As zonas onde foram observados os mecanismos de deformação estão indicadas da seguinte forma:

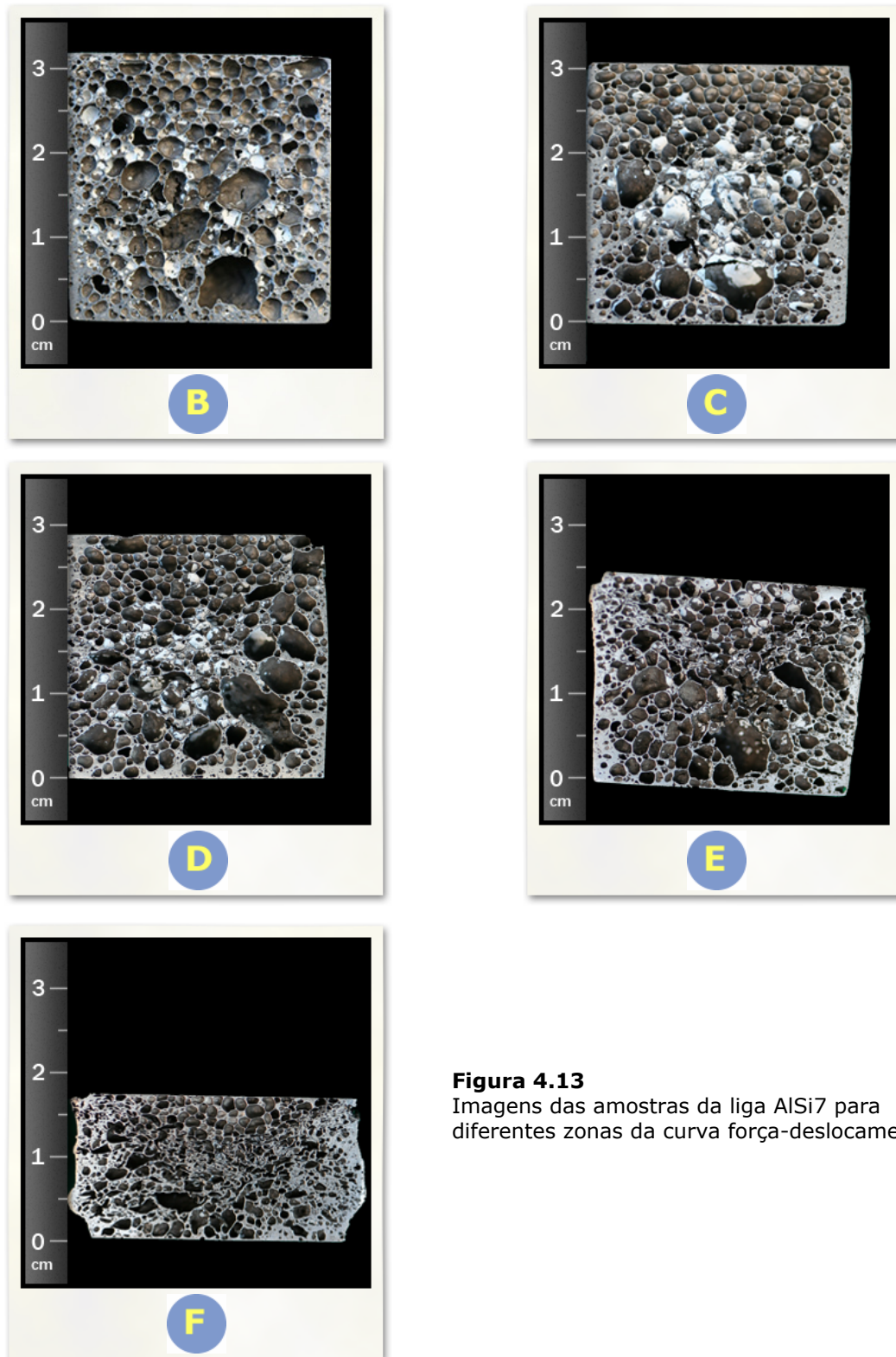
- **A** Amostras que não foram submetidas a esforços, caracterizadas no subcapítulo 4.1.1;
- **B** Deslocamento de 1 mm, região linear-elástica;
- **C** Deslocamento de 2 mm, região de limite de elasticidade;
- **D**, **E** e **F** Região do patamar de cedência para os deslocamentos de 4, 8 e 16 mm.



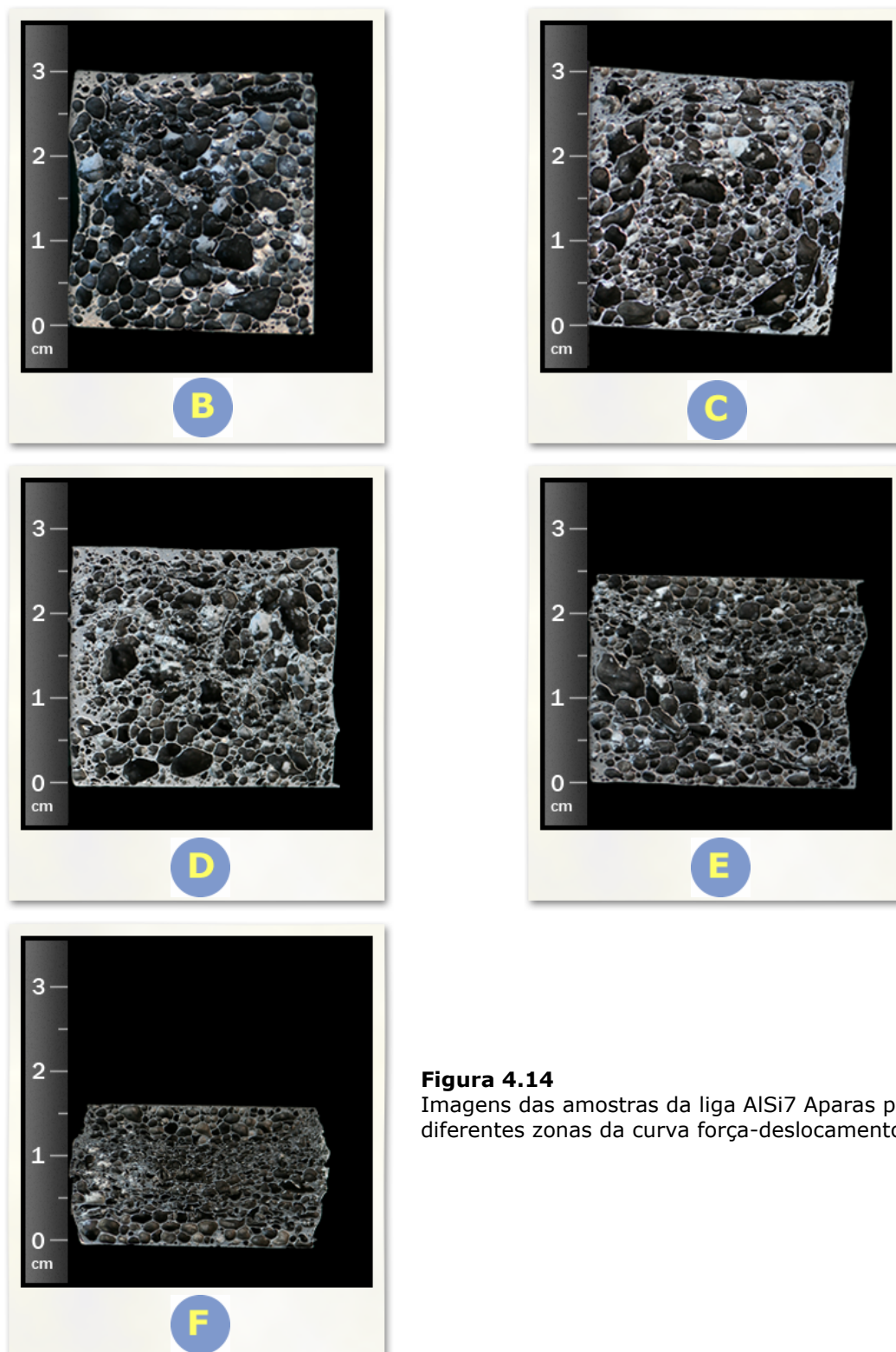
**Figura 4.12**

Curvas típicas globais força-deslocamento para os três tipos de espumas.

Nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 são apresentadas as imagens das secções transversais das amostras, para os três tipos de espumas, nos vários estágios de compressão.

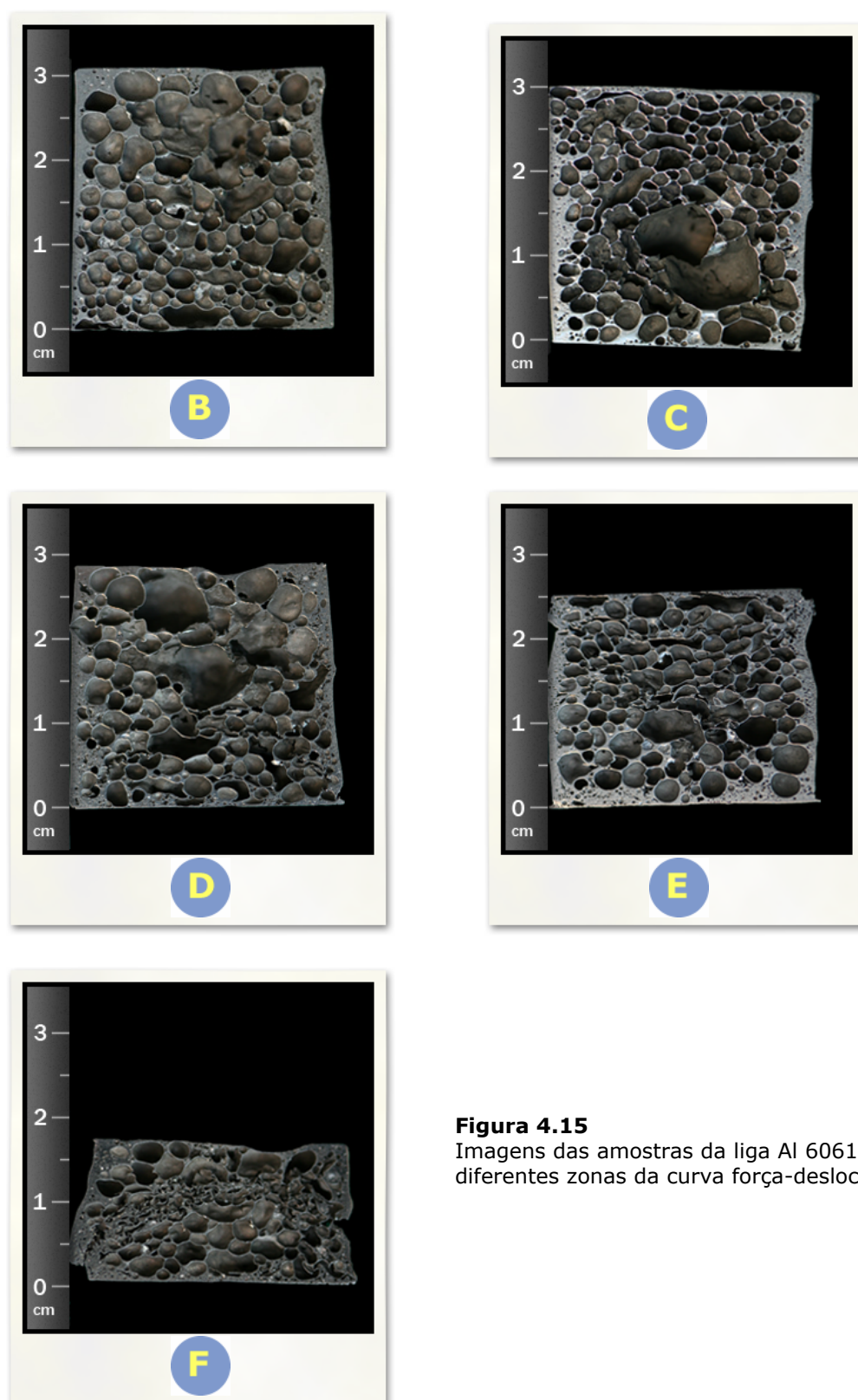


**Figura 4.13**  
Imagens das amostras da liga AlSi7 para diferentes zonas da curva força-deslocamento.



**Figura 4.14**  
Imagens das amostras da liga AlSi7 Aparas para diferentes zonas da curva força-deslocamento.





**Figura 4.15**  
Imagens das amostras da liga Al 6061 para diferentes zonas da curva força-deslocamento.

#### 4.1.2.1. REGIÕES DAS CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO EM COMPRESSÃO

Qualquer que seja o tipo de liga de Alumínio das espumas, as curvas tensão-deformação em compressão apresentam três regiões, associadas a diferentes mecanismos de deformação (Figura 4.12).

Na primeira, designada por região linear-elástica, a curva tensão-deformação pode ser aproximada a uma recta, cujo declive se traduz no módulo de Young, segundo a lei de Hooke ( $\sigma = E\varepsilon$ ). Idealmente, a deformação nesta região ocorre elasticamente, ou seja, após retirar o esforço o material recupera a forma inicial. Na prática verifica-se a existência de alguma deformação residual, devido à não uniformidade das espumas e ao seu comportamento viscoelástico.

Para estes tipos de espumas, observa-se que os declives para as ligas de Alumínio AlSi7 são sensivelmente iguais, enquanto que a liga Al 6061 apresenta maior declive.

Na segunda região, depois de atingida a tensão limite de elasticidade, as espumas começam a deformar plasticamente, admitindo grande quantidade de deformação para pequenas variações da tensão. Este comportamento interpreta-se pelo ligeiro declive do patamar de cedência.

As ligas AlSi7 Aparas e Al 6061 iniciam a deformação plástica antes da AlSi7. No entanto, o declive do patamar da segunda é menor, sendo o maior relativo à liga AlSi7.

Na última região, observa-se um aumento acentuado da tensão para pequenas variações de deformação e o declive que apresenta aproxima-se, no limite, dos valores do módulo de Young do material sólido,  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \approx E_s$  [20].

Em suma, as três regiões da curva de resposta à compressão acima referidas correspondem à deformação elástica (viscoelástica), ao colapso das células e à densificação (ou esmagamento), sucessivamente.

Segue-se uma descrição mais detalhada dos mecanismos de deformação responsáveis por estes três tipos de comportamento.

#### 4.1.2.2. MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO EM COMPRESSÃO

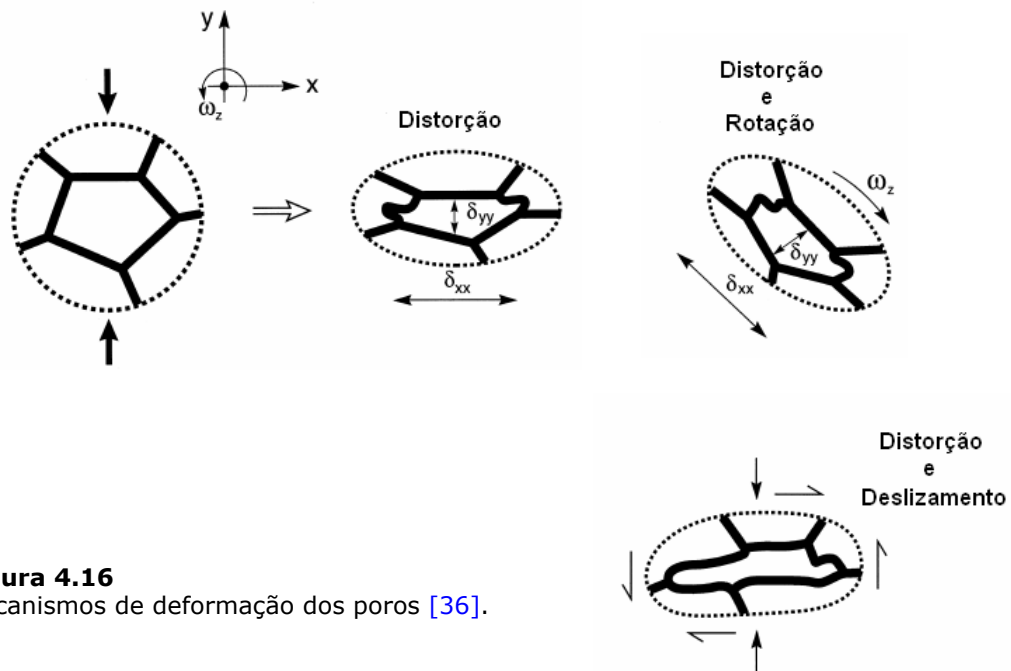
##### 4.1.2.2.1. DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

A deformação elástica, que ocorre na primeira região da curva, deve-se à flexão das arestas, ao alongamento das paredes celulares e à pressão exercida pelo gás aprisionado nas células.

Nas amostras correspondentes à zona B, para os três tipos de espumas (Figuras 4.13, 4.14 e 4.15), não é visível deformação.

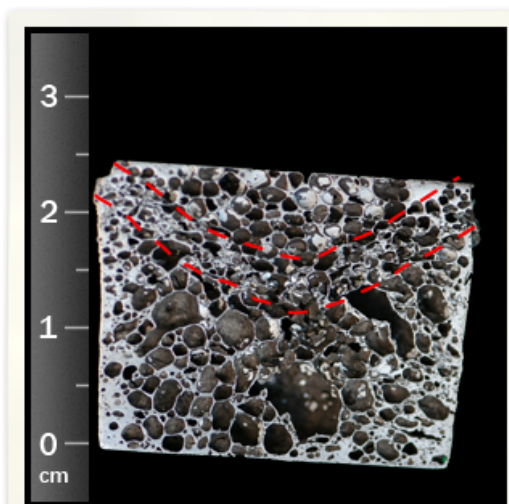
##### 4.1.2.2.2. COLAPSO DAS CÉLULAS

Quando ultrapassado o limite de elasticidade, dá-se o início do colapso das células por distorção (alongamento), rotação e/ou deslizamento das arestas e paredes celulares (Figura 4.16), ocorrendo deformação permanente. Esta deformação não é uniforme devido à própria estrutura irregular das espumas (distribuição de dimensão de poros, gradiente de densidades, diferentes espessuras das paredes celulares, etc). O ligeiro declive que caracteriza esta região pode estar relacionado com a compressão de fluido aprisionado nas células, ou com a presença de tensões nas membranas. Com o aumento da densidade da espuma, o declive também aumenta [20].

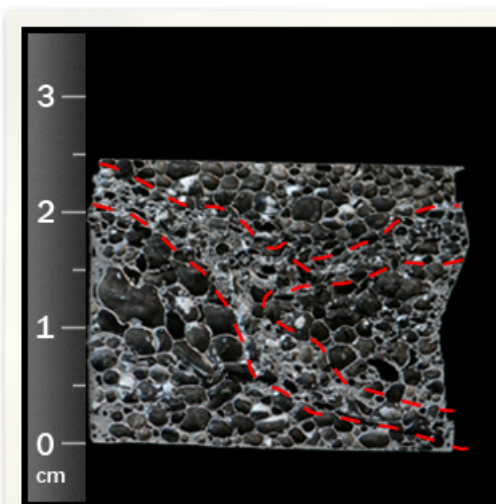


**Figura 4.16**  
Mecanismos de deformação dos poros [36].

Embora as células apresentem uma forma acentuadamente diferente após o colapso, em geral não se verifica fractura das paredes celulares. Por outro lado, dá-se o colapso das células vizinhas, progredindo em camadas sucessivas e originando uma ou mais bandas de deformação. Na Figura 4.17 apresentam-se exemplos de bandas de deformação.



**Figura 4.17A**

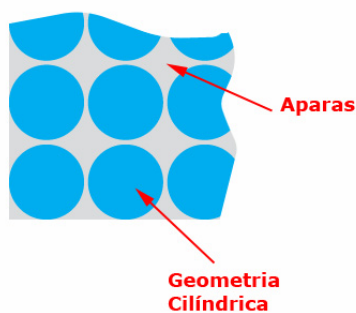


**Figura 4.17B**

**Figura 4.17**  
Bandas de deformação para amostras submetidas a um deslocamento de 8 mm  
A) Tipo I – AlSi7; B) Tipo II – AlSi7 Aparas.

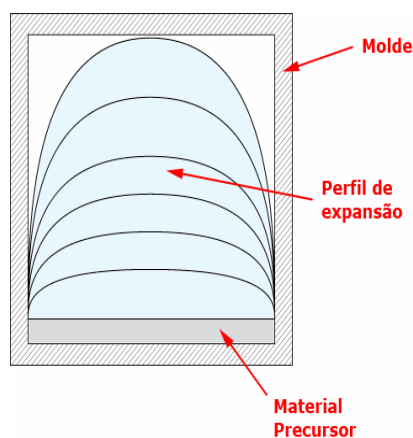


Verifica-se, por comparação das imagens da zona C nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15, que as amostras do tipo II começam a deformar para valores de deslocamento inferiores, apresentando deformações locais dispersas na superfície que evoluem no sentido da formação de várias bandas de deformação (Figura 4.14 D e E). Amostras da mesma liga, mas obtidas através de material precursor de geometria definida, apresentam uma única banda de deformação (Figura 4.13 E). A justificação para este comportamento relaciona-se com a obtenção de material precursor de geometria cilíndrica a partir do corte de painéis, donde também resultam aparas (Figura 4.18).

**Figura 4.18**

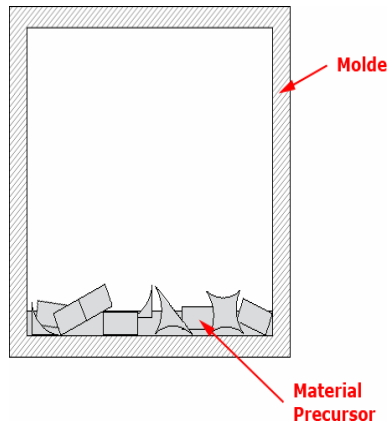
Esquema do corte de painéis de material precursor.

Quando o material precursor tem geometria cilíndrica, este é colocado na base do molde e o seu perfil de expansão assemelha-se ao exemplificado na Figura 4.19 [6].

**Figura 4.19**

Esquema de expansão de espumas fabricadas a partir de material precursor de geometria cilíndrica.

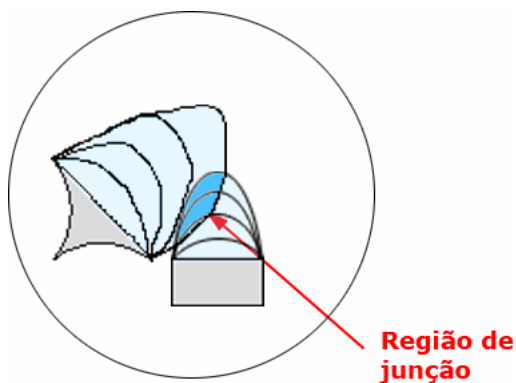
Na produção de espumas a partir de aparas, estas são colocadas no molde de forma aleatória, como se esquematiza na Figura 4.20, sendo que o somatório das suas massas é aproximadamente igual à massa do material precursor de geometria cilíndrica  $\left(m_{cil} \approx \sum_{i=1}^n m_i\right)$ .



**Figura 4.20**

Esquema da colocação das aparas de material precursor no interior do molde.

Os perfis de expansão de duas aparas podem, por exemplo, assemelhar-se aos representados na Figura 4.21 [37].

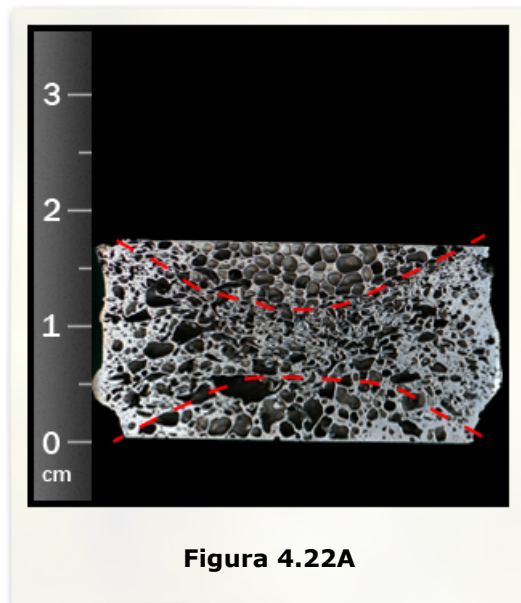
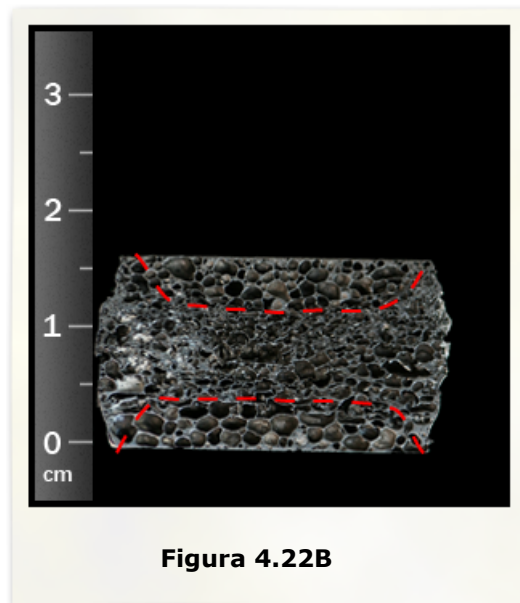


**Figura 4.21**

Perfis de expansão de duas aparas de material precursor.

Apesar do método de obtenção ser diferente do anterior (geometria cilíndrica) não se observam diferenças significativas na estrutura celular das espumas (Figuras 4.1 e 4.6). No entanto, as regiões de junção, onde se intersectam os

perfis de expansão das aparas, apresentam menor resistência (baixa densidade e/ou presença de imperfeições), provocando o aparecimento de mais bandas de deformação. Porém, com o evoluir da compressão, parecem convergir numa só banda de deformação, perpendicular ao eixo de aplicação do esforço (Figura 4.22).

**Figura 4.22A****Figura 4.22B****Figura 4.22**

Bandas de deformação para amostras submetidas a um deslocamento de 16 mm  
A) Tipo I – AlSi7; B) Tipo II – AlSi7 Aparas.

Quando a amostra de espuma se deforma junto aos travessões da máquina de ensaios, ao aumentar o seu diâmetro, as forças de atrito junto aos travessões opõem-se a esse movimento. Esta resistência de atrito só aparece na região em contacto com a ferramenta, enquanto que a meio da amostra a espuma deforma mais livremente e para o exterior. Como resultado, as amostras passam a apresentar um aspecto abaulado (Figura 4.22B), e constituem-se zonas não deformadas nas superfícies de contacto [23].

O aparecimento de deformações locais e de bandas de deformação nas amostras da liga Al 6061 dá-se de forma semelhante ao verificado para a liga AlSi7, em que o início do colapso ocorre nas regiões menos resistentes.

#### 4.1.2.2.3. DENSIFICAÇÃO

No final do estágio de compressão observa-se um aumento acentuado da tensão para pequenas variações de deformação. As células que sofreram colapso na zona do patamar de cedência são comprimidas adicionalmente, ocorrendo o seu esmagamento. Consequentemente, a rigidez aumenta aproximando-se da rigidez do material sólido de base. Na Figura 4.23 apresentam-se duas imagens representativas do tipo de deformação que ocorre na região de densificação. Estas imagens correspondem a uma amostra de secção rectangular, depois de comprimida a uma velocidade de 1 mm/min.



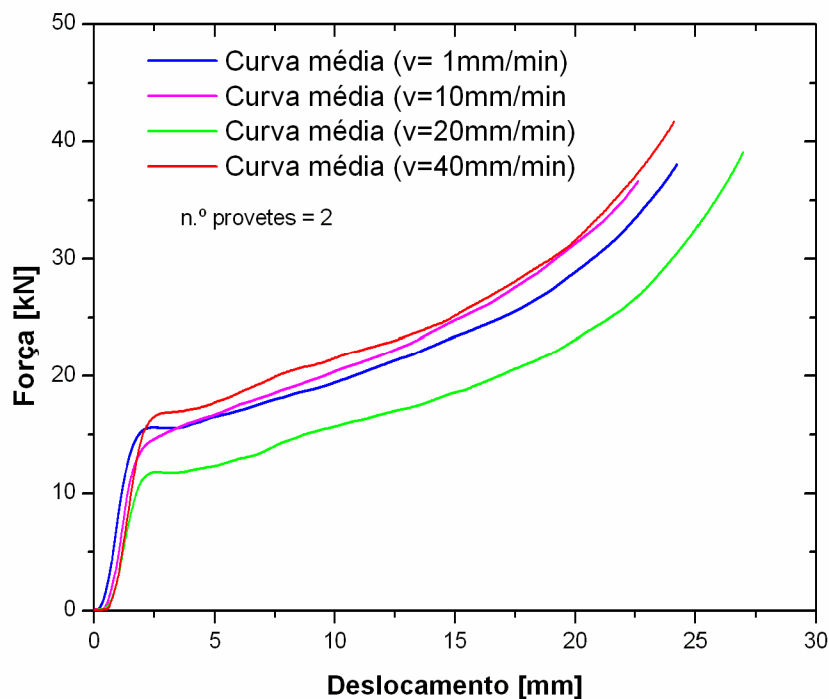
**Figura 4.23**

Deformação na região de densificação. A) Esmagamento das células; B) Zona densa.

## 4.2. ESTUDO DO EFEITO DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO NAS ESPUMAS DE ALUMÍNIO

Com os resultados dos ensaios anteriores foi possível analisar a estrutura celular de espumas de Alumínio de porosidade fechada, quando sujeitas a esforços de compressão. Tendo em conta que entre as potenciais aplicações deste tipo de materiais se encontram estruturas de absorção de energia, nos ensaios de compressão de amostras de geometria paralelepipedica, segundo descrito no subcapítulo 3.1.2, o interesse recaiu na determinação e avaliação das propriedades mecânicas das espumas.

Começou por se analisar as curvas médias força-deslocamento para diferentes velocidades de deformação (Figura 4.24).



**Figura 4.24**

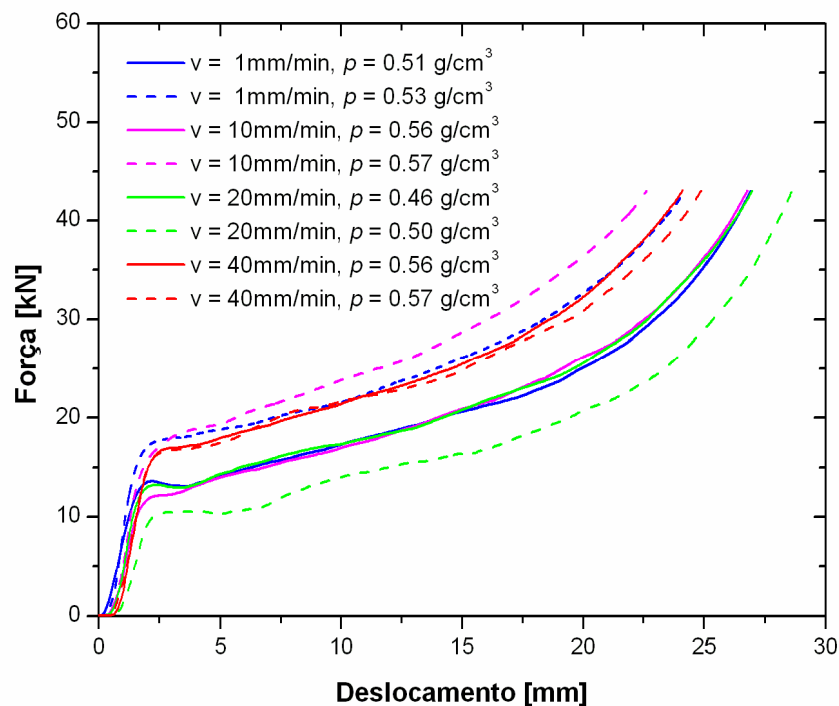
Curvas médias força-deslocamento para diferentes velocidades de deformação.

Nas curvas obtidas consegue-se identificar a zona linear-elástica, e a de deformação plástica. Por limitação da máquina de ensaios, a fronteira entre a

zona de deformação plástica e a de densificação não se encontra bem demarcada. Consequentemente, o patamar de cedência previsto para este tipo de ensaios não se apresenta claramente definido. Porém, para todas as curvas, verifica-se que após ser atingida a tensão limite de elasticidade a força vai aumentando ligeiramente com o deslocamento. Entre os 20 e os 25 mm de deslocamento este aumento é mais acentuado, dando-se a densificação.

Como se pode verificar pelo gráfico, para esta gama de velocidades, não se denota a dependência do comportamento mecânico das espumas com a velocidade de deformação.

Na Figura 4.25 encontram-se representadas as curvas individuais força-deslocamento de cada amostra.



**Figura 4.25**

Curvas individuais força-deslocamento para diferentes velocidades de deformação.

Observando o gráfico anterior, repara-se que existem dois conjuntos de curvas praticamente coincidentes. O primeiro conjunto, formado por três provetes

submetidos às velocidades de deformação de 1, 10 e 20 mm/min. E o segundo, por quatro provetes relativos às velocidades de deformação de 1, 10 e 40 mm/min.

Embora exista uma variação de densidade para os diferentes provetes, não se demonstra que seja este o parâmetro determinante para este tipo de comportamento. Por exemplo, a curva respeitante ao provete com menor densidade ( $0.46 \text{ g/cm}^3$ ; velocidade = 20 mm/min) assemelha-se à curva obtida para o provete com densidade de  $0.56 \text{ g/cm}^3$  e velocidade de deformação de 10 mm/min. Por outro lado, o provete que apresenta o mesmo valor de densidade de  $0.56 \text{ g/cm}^3$  para a velocidade de 40 mm/min, encontra-se no outro conjunto de curvas.

Como foi anteriormente mencionado, as espumas de Alumínio produzidas por pulverotecnologia não são homogêneas. As propriedades mecânicas destes materiais dependem não só da densidade, mas também da forma, orientação e distribuição dos poros, presença de imperfeições, condições de ensaio, geometria das amostras, *etc.*

Especificamente para estes ensaios de compressão, os provetes foram obtidos por corte de amostras de espumas com altura de 80 mm, aproximadamente. Quando foram colocados na máquina de ensaios, a superfície sem película exterior ficou em contacto com o travessão fixo. Assim sendo, para a mesma velocidade de deformação, um dos provetes foi comprimido segundo a direcção de expansão e, o outro, na direcção oposta. A discrepância observada nas curvas força-deslocamento poderá estar relacionada com este facto, já que o comportamento mecânico depende da direcção de aplicação do esforço [24, 38].

A curva representada a traço interrompido verde distancia-se de todas as outras devido, provavelmente, à presença de imperfeições nas superfícies exteriores da amostra de espuma (Figura 4.26).

**Figura 4.26**

Amostra de espuma de Alumínio de onde foram obtidos os provetes submetidos a esforços de compressão à velocidade de deformação de 20 mm/min.

As propriedades determinadas a partir destes ensaios encontram-se na Tabela 4.1.

Velocidade de deformação [mm/min]	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Módulo de Young [Mpa]	Tensão limite de elasticidade [MPa]	Energia absorvida para 50% de deformação [J/mm <sup>3</sup> ]	Eficiência da absorção de energia [%]
1	0.51	167.9	4.77	340	67.76
	0.53	252.3	5.83	435	66.64
10	0.56	160.2	4.28	336	64.00
	0.57	227.5	5.60	467	64.10
20	0.46	217.9	4.59	342	66.63
	0.50	145.2	3.74	264	63.65
40	0.56	209.1	5.93	424	65.61
	0.57	198.9	5.99	414	66.99

**Tabela 4.1**

Propriedades das espumas de Alumínio submetidas a esforços de compressão para velocidades de deformação diferentes.

O módulo de Young foi determinado pelo declive da zona linear-elástica da curva tensão-deformação, em carga. Os valores obtidos são cerca de cinco vezes inferiores aos encontrados na literatura (ver Tabela 2.5), calculados a partir da curva de descarga, para espumas obtidas por pulverotecnologia e com densidades aproximadamente iguais às dos provetes utilizados nestes



ensaios. Esta diferença poderá estar relacionada com as condições do ensaio em que foram determinados os valores do módulo de Young (curva de carga ou descarga), como também pode dever-se à geometria (não-definida) do material precursor que deu origem a estas amostras.

A tensão limite convencional de elasticidade é a tensão que produz 0.2% de deformação irreversível nas amostras, sendo determinada pela intersecção da recta paralela à zona linear-elástica que passa pela abcissa 0.2%, com a curva tensão-deformação.

Com os resultados obtidos, não é perceptível a influência da densidade ou da velocidade na tensão limite de elasticidade. A ausência de sensibilidade à velocidade de deformação foi já observada noutros estudos [39, 40].

A energia absorvida e a respectiva eficiência foram calculadas através das expressões (2.4) e (2.5). Como seria de esperar, as espumas revelam uma boa capacidade de absorção de energia, claramente acima dos 50%.

### 4.3. FLEXÃO DE PROVETES DO TIPO SANDUÍCHE

Painéis do tipo sanduíche com núcleo de espuma de Alumínio são utilizados em aplicações estruturais onde a redução do peso é um factor importante. Principalmente para a indústria automóvel, painéis e estruturas preenchidas com espumas têm vindo a ser estudados de forma a validar a sua aplicabilidade em estruturas de absorção de energia e impacto. Estas estruturas não só estão sujeitas a esforços axiais como também a dobragem e flexão, pelo que se torna necessário conhecer o seu comportamento mecânico nestas condições.

Neste trabalho, foram realizados ensaios de flexão em três pontos em provetes do tipo sanduíche com núcleo de espuma de Alumínio da liga AISi7, obtida através de pré-formas de material precursor de geometria definida, colado a duas chapas de aço AISI 304, de acordo com a metodologia descrita no subcapítulo 3.1.3.2.

O esforço aplicado, em flexão, leva a que uma das regiões do provete se contraia, devido à compressão, enquanto que a outra região sofre alongamento, devido à tracção (Figura 4.27).



**Figura 4.27**  
Representação esquemática da aplicação do esforço e respectivo resultado.

O comportamento das espumas de Alumínio, em compressão, está descrito no subcapítulo 4.1.2. De seguida, descreve-se o comportamento destes materiais quando submetidos a esforços de tracção, pois esta componente tem maior contribuição nos mecanismos de deformação à flexão.

### **4.3.1. COMPORTAMENTO À TRACÇÃO**

Tal como em compressão, as espumas de Alumínio deformam segundo mecanismos diferentes, dependendo do que se sucede nas células durante a aplicação do esforço. As curvas típicas tensão-deformação, em tracção, apresentam três zonas distintas em que a primeira zona, onde ocorre deformação elástica, é caracterizada pelo declive da recta,  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$  (módulo de Young). Na segunda região o material deforma plasticamente, sem que seja possível retomar a sua forma inicial e, por fim, dá-se a fractura da espuma.

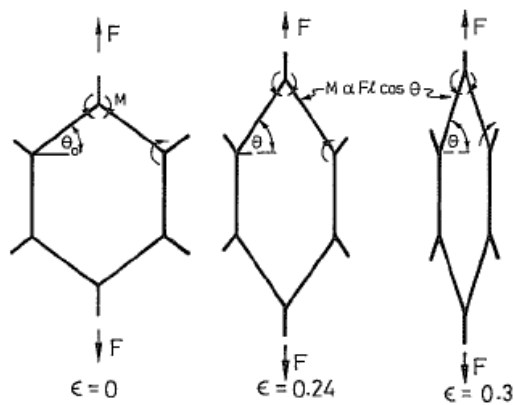
#### 4.3.1.1. MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO EM TRACÇÃO

##### 4.3.1.1.1. DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

A deformação das espumas no regime elástico, em tracção, é semelhante à que ocorre em compressão, e deve-se à flexão das arestas, ao alongamento das paredes celulares e à pressão provocada pela presença de gás aprisionado nas células.

##### 4.3.1.1.2. DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

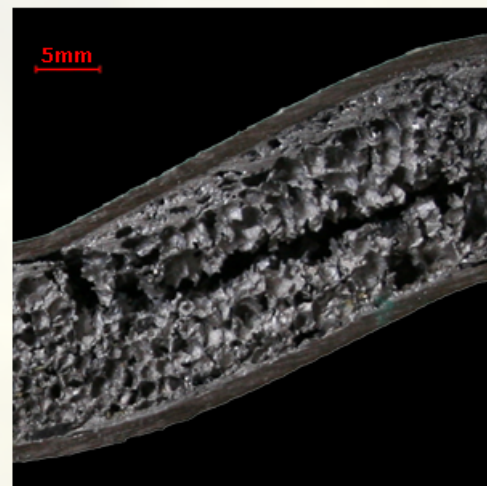
Enquanto que no regime elástico os mecanismos de deformação em tracção são semelhantes aos de compressão, no regime plástico diferem significativamente. Em compressão, a rotação das paredes celulares provoca um momento flector constante, ou que apresenta um ligeiro aumento, dando origem a uma zona de patamar praticamente horizontal. Em tracção, à medida que as arestas das células vão sofrendo rotação, alinhando-se com o eixo de aplicação do esforço (Figura 4.28), o momento flector diminui e maior força é necessária para se continuarem a deformar [20].

**Figura 4.28**

Alinhamento das arestas celulares com o eixo de aplicação da força [20].

#### 4.3.1.1.3. FRACTURA

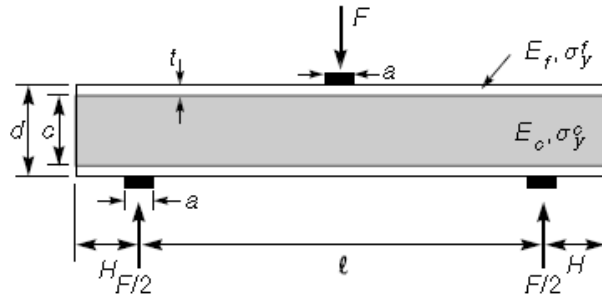
Quando as espumas são comprimidas até atingirem a densificação, observa-se o esmagamento progressivo das células. Tal não acontece para esforços de tracção, onde a ruptura ocorre por propagação de fendas (Figura 4.29).

**Figura 4.29A****Figura 4.29B****Figura 4.29**

Fractura por propagação de fendas em A) película exterior; B) núcleo.

### 4.3.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

A Figura 4.30 representa a configuração de um provete do tipo sanduíche, onde os índices **c** e **f** designam o núcleo (*core*) e as chapas (*face sheets*), respectivamente.



**Figura 4.30**  
Esquema de um provete do tipo sanduíche [13].

Para análise e cálculo, considera-se que a secção transversal não varia ao longo dos provetes, e que o núcleo em espuma é homogêneo e se encontra perfeitamente unido às chapas de Aço.

Assim sendo, o momento flector máximo,  $M$ , relaciona-se com a força,  $F$ , pela expressão [13]

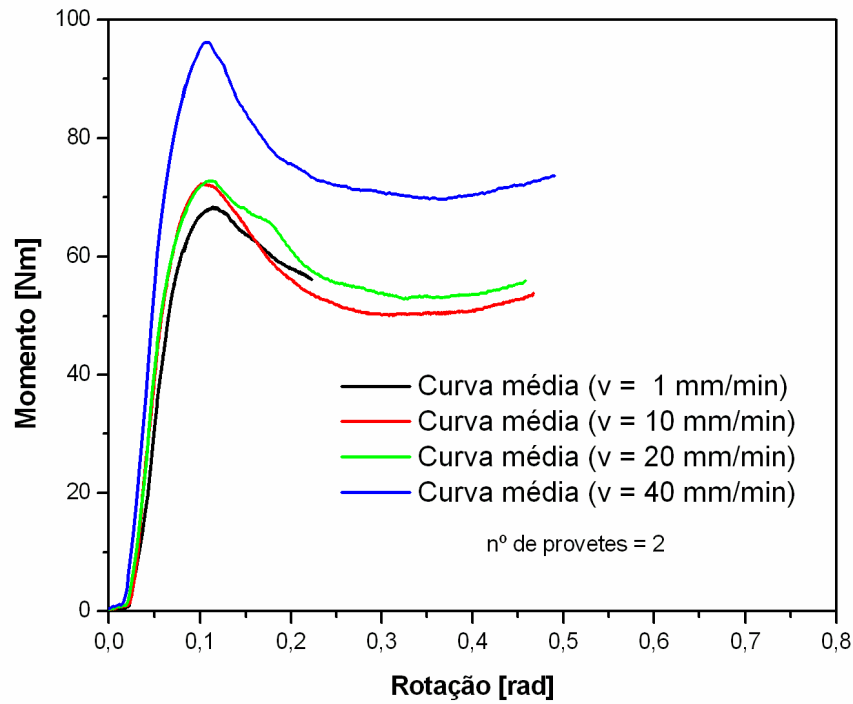
$$(4.1) \quad M = \frac{Fl}{4}$$

e o ângulo de rotação,  $\theta$ , vem em função do deslocamento do punção,  $y$ , [41]

$$(4.2) \quad \theta = 2 \arctg\left(\frac{2y}{l}\right).$$

Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados às velocidades de 1, 10, 20 e 40 mm/min. Simultaneamente, registaram-se os valores da força e do deslocamento do punção que, posteriormente, foram transformados em momento flector e ângulo de rotação de acordo com as expressões 4.1 e 4.2.

As curvas médias momento-rotação, obtidas para as diferentes velocidades de deformação, encontram-se representadas na Figura 4.31.



**Figura 4.31**

Curvas médias momento-rotação para diferentes velocidades de deformação.

Como se pode observar pelo gráfico, para velocidades baixas a resposta à flexão é muito semelhante e as curvas aproximam-se. Para a velocidade mais elevada, de 40 mm/min, o máximo da curva é atingido sensivelmente para o mesmo valor de rotação, mas o momento flector é superior às demais. Este comportamento pode estar relacionado com a componente viscoelástica das espumas para pequenas deformações, sugerindo a redução da capacidade de reorganização da estrutura celular com o aumento da velocidade de ensaio [42].

Sabendo que a força aplicada,  $F$ , é dada pela expressão [22]

$$(4.3) \quad F = \frac{48EI}{l^3} y,$$

sendo  $I = \frac{bd^3}{12}$  o segundo momento de inércia da secção transversal. Das expressões 4.1 e 4.3 vem que

$$(4.4) \quad M = \frac{12EI}{l^2} y.$$

Colocando  $y$  em função de  $\theta$  na equação 4.2, tem-se

$$(4.5) \quad y = \frac{l}{2} \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right).$$

Admitindo que para pequenos valores de  $\theta$ ,  $\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) \approx \frac{\theta}{2}$ , fica

$$(4.6) \quad y \approx \frac{l}{4} \theta.$$

Substituindo  $y$  na equação 4.4 obtém-se a expressão final que relaciona o ângulo de rotação com o momento flector, da seguinte forma:

$$(4.7) \quad M \approx \frac{3EI}{l} \theta.$$

Significa portanto, que no gráfico momento-rotação, o declive da zona linear-elástica, será aproximado por

$$(4.8) \quad \frac{dM}{d\theta} \approx \frac{3I}{l} E$$

donde se retira o valor do módulo de Young à flexão da sanduíche.

Para determinar o módulo de Young do núcleo recorreu-se à regra das misturas [43], obtendo

$$(4.9) \quad E_c = \frac{V_c \cdot E_T \cdot E_f}{E_f - E_T \cdot V_f},$$

onde  $V_c$  e  $V_f$  são às fracções volúmicas do núcleo e das chapas, respectivamente e  $E_f = 193 \text{ GPa}$  [44].

O momento máximo corresponde ao pico da curva e a energia absorvida calcula-se como sendo a área abaixo da curva [41],

$$(4.10) \quad E_{abs} = \int_{\theta_o}^{\theta_f} M(\theta) d\theta.$$

As propriedades obtidas através destes ensaios encontram-se na Tabela 4.2.

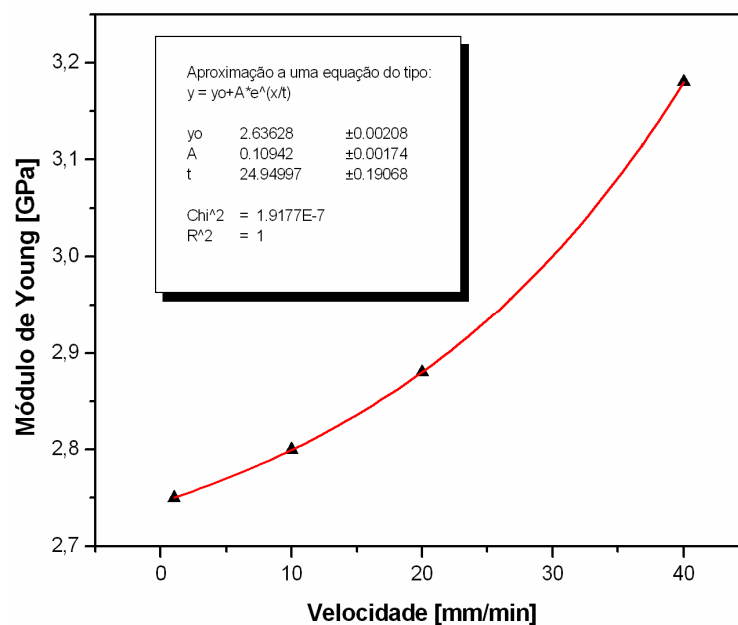
Velocidade de deformação [mm/min]	Módulo de Young Sanduíche [GPa]	Módulo de Young Núcleo [GPa]	Momento máximo [Nm]	Majorante [rad]	Energia absorvida para a rotação de 0.2 rad <sup>a</sup> [J]
1	3.18	2.75	71.55	0.10	9.49
10	3.24	2.80	73.20	0.10	10.07
20	3.33	2.88	73.05	0.11	10.41
40	3.68	3.18	96.75	0.11	13.50

**Tabela 4.2**

Propriedades das espumas de Alumínio submetidas a flexão para velocidades diferentes.

<sup>a</sup> Como o deslocamento registrado não foi igual em todos os ensaios, a energia absorvida foi determinada até à rotação de 0.2 radianos.

Constata-se que os valores do módulo de Young aumentam com o aumento da velocidade dos ensaios. O gráfico da Figura 4.32 demonstra que este crescimento não é linear mas aproxima-se a uma equação do tipo exponencial.



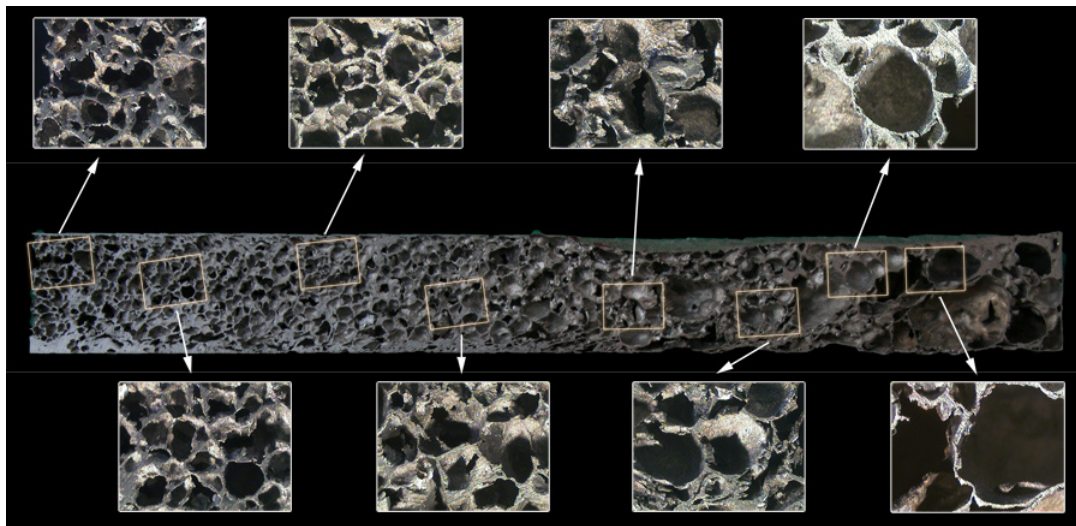
**Figura 4.32**

Gráfico do módulo de Young em função da velocidade de ensaio.



### 4.3.3. ANÁLISE DA FRACTURA

Como se pode verificar pela Figura 4.33, estas amostras, tal como as dos ensaios anteriores, apresentam um elevado gradiente de densidades em que os poros aumentam consideravelmente a sua dimensão ao longo do provete. Considerar o núcleo como sendo homogéneo poderá ser aceitável para simplificação de cálculos. No entanto, este gradiente condiciona o tipo de falhas e/ou deformação que ocorrem nas espumas quando submetidas a esforços.



**Figura 4.33**  
Gradiente de densidades.

Observou-se para todos os ensaios que o aparecimento de fendas se inicia na zona central do provete, onde o momento flector é máximo. Posteriormente, a propagação das fendas dá-se na direcção em que a espuma apresenta menor densidade, até à fractura do núcleo, que ocorre quando é atingida a linha neutra. Este comportamento está de acordo com os mecanismos descritos no subcapítulo 4.3.1.

Na Figura 4.34 encontram-se imagens das secções transversais dos provetes e das respectivas faces exteriores.

**Velocidade de 1 mm/min**



**Velocidade de 10 mm/min**



**Velocidade de 20 mm/min**



**Velocidade de 40 mm/min**



**Figura 4.34**

Imagens das secções transversais dos provetes e respectivas faces exteriores para as diferentes velocidades de ensaio.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. ESTRUTURA CELULAR

As espumas de diferentes ligas de Alumínio, obtidas por pulverotecnologia, apresentam uma grande dissemelhança entre si, donde se conclui que a reprodutibilidade das propriedades, através deste processo de fabrico, ainda não foi alcançada. A caracterização das espumas torna-se, portanto, bastante complexa e um maior número de estudos é necessário.

A estrutura celular das espumas depende de todos os processos e parâmetros que envolvem o seu fabrico, como por exemplo:

- do metal de base;
- da forma como os constituintes do material precursor se distribuem na matriz;
- da geometria do material precursor que dá origem às espumas;
- da velocidade de arrefecimento após a expansão;
- do tipo de molde onde se dá o arrefecimento;
- *etc.*

Como resultado obtêm-se espumas que apresentam:

- anisotropia e heterogeneidade;
- uma película exterior de espessura variável;
- poros de geometria diferentes, entre as quais esférica e poliédrica;
- poros de diferente dimensão, maioritariamente inferiores a 4 mm de diâmetro;
- imperfeições, como porosidades de pequena dimensão e fendas, nas paredes celulares e na película exterior.

Dependendo da estrutura celular, do tipo de liga, e da de solicitação a que estão sujeitas, a resposta comportamental das espumas difere significativamente. Seguem-se as principais conclusões sobre mecanismos de deformação.

## **5.2. MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO**

Este trabalho permite concluir que os mecanismos de deformação que ocorrem à compressão diferem dos de flexão. Ao serem comprimidas, as espumas começam por se deformar elasticamente. As arestas flectem e alongam-se até que, passando o limite de elasticidade, se dá a formação de bandas de deformação perpendiculares ao eixo de aplicação do esforço. Do esmagamento progressivo das células resulta uma estrutura densa, cuja rigidez se aproxima, no limite, da do material base.

No caso das espumas da liga Al 6061, conclui-se que o aparecimento de um maior número de bandas de deformação está relacionado com as regiões de junção, causadas pela expansão das aparas de material precursor

Embora o mecanismo de deformação elástica em flexão seja igual ao de compressão, no regime plástico as arestas das células tendem a alinhar-se com o eixo de aplicação do esforço. Este alinhamento provoca uma diminuição do momento flector enquanto que em compressão o momento se mantém praticamente constante, denunciando na curva tensão-deformação um patamar de cedência praticamente horizontal.

Em vez de um esmagamento progressivo, em flexão a ruptura inicia-se pelo aparecimento de fendas na zona central das amostras, onde o momento é máximo, que posteriormente se propagam na direcção de menor densidade.

## **5.3. COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO**

Para a gama de valores de velocidade de deformação utilizada neste trabalho, não se pode tirar qualquer conclusão sobre a influência da velocidade dos ensaios no comportamento mecânico das espumas à compressão.

Dos resultados experimentais dos ensaios de compressão, conclui-se que estas espumas têm uma boa capacidade de absorção de energia, com eficiências entre os 64 e os 69%. Além disso, reitera-se que as características das espumas dependem fortemente do processo de fabrico e que estas condicionam o seu comportamento mecânico.

#### **5.4. COMPORTAMENTO À FLEXÃO**

Dos resultados dos ensaios de flexão conclui-se que o momento flector máximo, correspondente ao limite de elasticidade, depende da velocidade, sendo significativamente maior para a velocidade mais elevada de 40 mm/min e aproximadamente igual para as velocidades mais baixas de 1, 10 e 20 mm/min.

O ângulo de rotação ao qual se dá a passagem do regime elástico para o plástico é sensivelmente o mesmo para todas as velocidades de ensaio.

Mais se conclui, que o módulo de Young cresce exponencialmente com o aumento da velocidade.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com o objectivo de melhor caracterizar as espumas destas ligas de Alumínio, seguem-se algumas sugestões de trabalhos futuros:

- i) Realização de ensaios de compressão, até valores de deslocamento correspondentes a diferentes regiões das curvas força-deslocamento, numa única amostra de espuma, de forma a observar os mecanismos de deformação e ocorrência de bandas de deformação;
- ii) Realização de ensaios de compressão numa gama mais alargada de velocidades de deformação, para verificar o efeito da velocidade na resposta à compressão;
- iii) Realização dos ensaios ii) em amostras com e sem película exterior, e para direcções de aplicação de esforço diferentes, com o objectivo de avaliar os efeitos da película exterior e da anisotropia, conjuntamente com a variação de velocidade;
- iv) Realização dos ensaios ii) em provetes de diferentes geometrias (cilíndricos, cúbicos, *etc.*);
- v) Realização de ensaios de flexão em amostras de espuma (apenas núcleo) a diferentes velocidades;
- vi) Realização de ensaios de flexão em provetes do tipo sanduíche com secções transversais de diferentes dimensões.



**BIBLIOGRAFIA**

- 1 Jorge, Alexandre Fonseca, Arruda, António Celso Fonseca de, *Espumas e Esponjas de Alumínio em Aplicações Automotivas*.
- 2 Sosnik, B., US Patent 2 434 775, 1948.
- 3 Elliot, J. C., US Patent 2 751 289, 1956.
- 4 Allen, B. B., US Patent 3 087 807, 1963.
- 5 Degischer, Hans-Peter, Kriszt, Brigitte, *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications*, Wiley-VCH, 2002.
- 6 Duarte, I.M.A., *Espumas metálicas processo de fabrico, caracterização e simulação numérica*. Porto, 2005.
- 7 <http://www.cymat.com>
- 8 <http://www.mepura.at>
- 9 <http://www.recemat.com>
- 10 [http://en.wikipedia.org/wiki/Metal\\_foam](http://en.wikipedia.org/wiki/Metal_foam)
- 11 [http://en.wikipedia.org/wiki/Closed\\_cell\\_foam](http://en.wikipedia.org/wiki/Closed_cell_foam)
- 12 <http://www.rmoutinho.com.pt>
- 13 Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., Wadley, H. N. G., *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth-Heinemann. 2000
- 14 Tavares, J.I.M., *Influência das Condições Ambientais nas Espumas de Alumínio*. Universidade de Aveiro, 2008.



- 15 Ferreira, José M.G. de Carvalho, *Tecnologia da pulverometalurgia*, Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- 16 <http://www.iwe-greifswald.de/>
- 17 Duarte, Isabel M. A., Santos, Mário J. G., Vide, Manuel, *Processo contínuo de produção de peças e protótipos em espumas metálicas*, Ingenium Nº 104, Março/Abril 2008.
- 18 <http://www.ifam.fraunhofer.de>
- 19 <http://www.alulight.com/>
- 20 Gibson, Lorna J., Ashby, Michael F., *Cellular Solids – structure and properties*, 2<sup>nd</sup> edition, Cambridge University Press, 1997.
- 21 Motz, C., Pipapan, R., Deformation behaviour of closed-cell aluminium foams in tension, Erich Schmid Institute of Material Science, Austrian Academy of Sciences, 2001.
- 22 Davim, J.P., Magalhães, A.G., *Ensaio Mecânicos e Tecnológicos*, 2<sup>a</sup> Edição, Publindústria, 2004.
- 23 Branco, A.G. de Moura, *Mecânica dos materiais*, 4<sup>a</sup> edição, Fundação Calouste Gulbenkian, 2006.
- 24 Andrews, E., Sanders, W., Gibson, L.J., *Compressive and tensile behaviour of aluminium foams*, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1998.
- 25 <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>
- 26 Andrews, E.W., Gioux, G., Onck, P., Gibson, L.J., *Size effects I ductile cellular solids, part II: experimental results*, Mater. Sci. Eng.

- 
- 27 Peroni, Lorenzo, Avalle, Massimiliano, Peroni, Marco, *The mechanical behaviour of Al foam structures in different loading conditions*, Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italy, 2007.
- 28 Steeves, Craig A., Fleck, Norman A., *Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: analytical models and minimum weight design*, Engineering Department, Cambridge University, UK, 2003.
- 29 Banhart, Jonh, *Aluminium foams for lighter vehicles*, Int. J. Vehicle Design, Vol. 37, Nos. 2/3. 2005.
- 30 <http://www.hydro.com/>
- 31 <http://www.metalfoam.net/>
- 32 <http://www.fraunhofer.de>
- 33 Schaeffler, P., Rajner W., Claar, D., Trendelenburg, T, Nishimura, H., *Production, Properties, and Applications of Alulight® Closed-Cell Aluminum Foams*, Alulight International GmbH, Austria.
- 34 <http://www.leica.microsystems.com>
- 35 <http://www.troostwijkauctions.com/>
- 36 Bastawros, A-F., Bart-Smith, H., Evans, A. G., *Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminum alloy foam*, Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, Cambridge, 1999.
- 37 Duarte, I. M. A., Santos, M. J. G., Vide, M, *Project FCEM – Development of continuous technological process for the production of metal foams components, Industrial Funded (QREN Program)*, Final

- Report, 1 March 2007, Departamento de Materiais e Tecnologia de Produção do Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia e Inovação (INETI).
- 38 Banhart, J., Baumeister, J., *Deformation characteristics of metal foams*, Fraunhofer Institute for Applied Materials Research, Bremen.
- 39 Hall, I. W., Guden\*, M., Yu, C.-J.\*, *Crushing of Aluminum closed-cell foams: density and strain rate effects*, Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, Newark, \*Izmir Yuksek Teknoloji Enstitusu, Izmir, Turkey, \*Fraunhofer Center – Delaware, 2000.
- 40 Yadav, S., Chichili, D.R., & Ramesh, K.T., *The Mechanical Properties of a 6061-T6 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Metal-Matrix Composite at High Rates of Deformation*, Acta Metallurgica, pp. 4453-4464, 1995.
- 41 Chen, Weigang, *Experimental and numerical study on bending collapse of aluminum foam-filled hat profiles*, Impact and Crashworthiness, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2001.
- 42 <http://en.wikipedia.org/wiki/Viscoelasticity>
- 43 <http://everything2.com/e2node/Law%2520of%2520Mixtures>
- 44 <http://www.efunda.com/>